

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислюваної техніки

Автоматики та управління в технічних системах

«На правах рукопису»

УДК 004.942

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ О.І. Ролік

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Моделі і методи управління групою незалежних рухомих об'єктів у 3D просторі»

Виконав:

студент VI курсу, групи ІА-61м

Пріліпухов Євгеній Вадимович _____

Керівник:

Доцент каф. АУТС, к.т.н., доцент

Долина В.Г. _____

Рецензент:

Доцент каф. ІТМ ММІ, к.т.н., доцент

Красновид Д.О. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	10
1.1 Робототехнічна система аеронавігації та картування перешкод на великих зовнішніх майданчиках	10
1.2 Формулювання та вирішення проблеми аеронавігації безпілотної апарату	11
1.3 Координатні кадри та визначення	12
1.4 Геометричний режим датчика	13
1.4.1 Внутрішні параметри.....	13
1.4.2 Нестандартні параметри.....	14
1.4.3 Спотворення об'єктива	16
1.5 Особливості екстракції	16
1.6 Оцінка позиції	17
1.6.1 Оцінка земної робочої позиції.....	17
1.6.2 Оцінки трансформації і оцінки перешкод	20
1.7 Навігація та контроль	21
1.7.1 Повітряний робот.....	21
1.7.2 Наземний робот.....	22
1.8 Експерименти	24
1.8.1 Симуляції	25
1.8.2 Реальне середовище.....	31
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КООРДИНОВАНИХ СТАБІЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ КОМПРОМІСІВ І ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ.....	37
2.1 Концепція і визначення узагальненого управління ієрархічної системи з урахуванням отримання оптимального вигляду системи.....	37
2.2 Визначення та структурні властивості ієрархічної рівноваги в багаторівневих системах управління і багаторівневих СТЕК теорії оптимального управління ББС як основи КОСТЕК	40
2.2.1 Методи ієрархічного врівноваження і узагальнення стратегії міжрівневого координування за Штакельбергом	40

2.2.2 Рівноважно-арбітражні алгоритми параметричних стабільно-ефективних компромісів оптимізації порівневих багатооб'єктних багатокритеріальних систем	44
2.2.3 Методика формування оптимальної ієрархічної системи управління в формі алгоритму КОСТЕК на основі ІРІДІШ і РАО забезпечення балансування, і граничної ефективності ББС рівнів	49
2.3 Варіанти вирішення задачі оптимального управління ієрархічною системою	53
2.4 Рішення лінійно-квадратичної задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи на основі КОСТЕК в нелінійній моделі керування	54
2.5 Рішення параметризованої задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізація» літального апарату на основі КОСТЕК з адаптацією керуючих параметрів системи стабілізації	59
Висновки по другому розділу	64
3 БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМАЛЬНОЇ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ «НАВЕДЕННЯ-СТАБІЛІЗАЦІЇ» БПЛА НА ОСНОВІ КООРДИНОВАНИХ СТАБІЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ КОМПРОМІСІВ	66
3.1 Результати рішення нелінійної задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізації» БПЛА на основі КОСТЕК з адаптацією системи стабілізації	66
3.1.1 Варіант моделювання №0. Моделювання без урахування балансування каналів на рівні наведення	66
3.1.2 Варіант моделювання №1. Базовий варіант	71
3.1.3 Варіант моделювання №2. Варіація отримання оптимального рішення на основі РАА	75
3.1.4 Варіант моделювання №3. Варіація отримання оптимального рішення на основі РАА. Використання точного опису параметрів ССт	80
3.1.5 Варіант моделювання №4. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом	84
3.1.6 Варіант моделювання №5. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт	89
3.1.7 Варіант моделювання №6. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень	94

3.1.8 Варіант моделювання №7. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень	99
3.1.9 Варіант моделювання №8. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень	104
Висновки по третьому розділу	108
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	111
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	124
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	126
ДОДАТОК А – ТЕЗИ	133
ДОДАТОК Б – СТАТТЯ	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСУ – Автоматична система управління

ББС – Багатооб’єктна багатокритеріальна система

ББС-Р – Багатооб’єктна багатокритеріальна система регулювання

ББС-У – Багатооб’єктна багатокритеріальна система управління

БПА – Безпілотний апарат

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

ВС – Виконавча система

ІДІ – Ієрархічні диференціальні ігри

ІРСУ – Ієрархічна розподілена система управління

КОСТЕК – Координовані стабільно-ефективні компроміси

ЛА – Літальний апарат

МАС – Мультиагентна система

ПКЗУ – Програмно-коректуючий закон управління

РАА – Рівноважно-арбітражний алгоритм

РАО – Рівноважно-арбітражна оптимізація

СНУ – станція наземного управління

ССО – Структурно складний об’єкт

ССт – Система стабілізації

СТЕК – Стабільно-ефективний компроміс

СТС – складна технічна система

СУ – Система управління

ВСТУП

Актуальність теми. Складність сучасних об'єктів управління, велика кількість і суперечливість показників якості обумовлюють використання багаторівневих багатокритеріальних систем управління з мультиагентною структурою. У цьому випадку загальна задача управління розбивається на ряд підзадач, які вирішуються локальними керуючими елементами. Істотною перевагою ієрархічного підходу є можливість проведення паралельних обчислень, коли здійснюється одночасне вирішення низки локальних задач і координація частних рішень. Крім того, побудова системи управління за ієрархічним принципом дозволяє знизити складність окремих вирішуваних завдань, підвищити надійність роботи системи в цілому, прискорити процес проектування системи управління.

Багато досліджень пов'язані з розробкою мультиагентних систем і подальшої роботи з ними, при цьому сфера застосування подібних систем досить обширна. Формування та підвищення ефективності багаторівневих систем стає звичайною практикою при управлінні складними виробничими об'єктами, літальними апаратами і комплексами, енергетичними системами, організаційними структурами, процесами проектування, наукових досліджень і моделювання, мультимедійними системами тощо[1].

Зокрема, актуально розвивати дослідження мультиагентної системи управління літальними апаратами в структурі: прийняття рішення (вибір шляху) - управління (наведення) - регулювання (стабілізація), як єдину багатоканальну на кожному рівні складну технічну систему (СТС) з порівневою багатокритеріальною оптимізацією взаємодіючих каналів і міжрівневою координацією[2].

Задача оптимізації управління складними технічними системами (СТС) є актуальною, так як розвиває теорію оптимального управління багатооб'єктними багатокритеріальними системами (ББС), яка базується на комбінації методів класичної теорії управління і теорії ігор в формі стабільно-ефективних компромісів[3]. В рамках основної частини досліджень управління СТС розглядається як ієрархічна гра зі

структурованими рівнями в формі ББС з міжрівневою координацією[4]. Для даного типу ієрархічних систем формуються алгоритми отримання управління СТС і іншими структурами, що знаходять своє відображення в роботах вітчизняних і зарубіжних авторів[5]. Розвиток і застосування мультиагентних підходів в складних задачах управління дозволяє підвищити їх якість[6]. Ускладнення опису розглянутих СТС призводить до необхідності розробки методів координації багатокритеріальних задач з отриманням координованих стабільно-ефективних компромісів на всіх рівнях ієрархії[7].

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської роботи є розробка і дослідження координованих стабільно-ефективних компромісів (КОСТЕК) оптимізації мультиагентних систем управління на основі ієрархічних врівноважень[8] і методів оптимального управління багатооб'єктними багатокритеріальними системами (ББС)[9] із застосуванням результатів у дворівневій багатоканальній системі «наведення-стабілізації» безпілотного літального апарату (БПЛА).

Об'єктом дослідження є мультиагентна система управління безпілотними апаратами.

Предметом дослідження є удосконалення і дослідження координованих стабільно-ефективних компромісів оптимізації мультиагентних систем управління на основі ієрархічних врівноважень і методів оптимального управління багатооб'єктними багатокритеріальними системами із застосуванням результатів у дворівневій багатоканальній системі «наведення-стабілізації»[10] безпілотного літального апарату.

Для досягнення основної мети дослідження необхідно вирішити ряд завдань:

- дослідити стратегію міжрівневого координування на основі узагальненого ієрархічного врівноваження за Штакельбергом;
- дослідити методику отримання КОСТЕК;
- дослідити і поліпшити алгоритм оптимізації дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізація» БПЛА на основі КОСТЕК;

- отримати рішення лінійно-квадратичної задачі багатокритеріального синтезу дворівневої системи управління на основі КОСТЕК для нелінійної моделі керування;
- дослідити оптимальну дворівневу багатоканальну систему управління БПЛА;
- провести багатфакторний аналіз ефективності оптимальної дворівневої системи «наведення-стабілізації» на основі КОСТЕК.

Методи досліджень. Проведені в магістерській роботі розробки і дослідження базуються на методах мультиагентних систем, проектування ієрархічних розподілених систем, теорії оптимального управління ББС, методах дослідження нелінійних безперервних систем автоматичного управління і сучасних методах математичного моделювання.

Наукова новизна роботи. До нових наукових результатів можна віднести:

1. Рішення лінійно-квадратичної задачі багатокритеріального синтезу дворівневої системи управління на основі КОСТЕК для нелінійної моделі керування;
2. Формування математичної дворівневої багатоканальної моделі системи «наведення-стабілізації» БПЛА з багаторівневими перехресними зв'язками;
3. Формування властивостей координування нижнього рівня при оптимізації дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізації» БПЛА на основі КОСТЕК.

Практичне значення одержаних результатів. Практичними рекомендаціями одержаних результатів є створення системи керування групою незалежних об'єктів у 3D просторі.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на конференції: Summer InfoCom Advanced Solutions 2017 (додаток А).

Публікації. За матеріалами магістерської роботи опубліковано 1 наукова робота в науковому журналі: Інфокомунікаційні системи та технології №2 (додаток Б).

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Робототехнічна система аеронавігації та картування перешкод на великих зовнішніх майданчиках

Навігацію мобільного робота можна описати як проблему пошуку зручного і без зіткнення руху між двома позиціями (положенням та орієнтуванням) цього робота, тоді як відображення перешкод полягає в використанні зондування можливостей для отримання представлення невідомих перешкод таким чином, що це корисно для навігації. Ця частина роботи являє собою альтернативу для вирішення цих двох завдань, використовуючи систему, яка поєднує в собі літаючий апарат та земний робот, використовуючи лише локалізацію земного робота та зображення з однієї камери на борту безпілотної літаючої апарату[11].

Методи локалізації та виявлення перешкод, необхідні для навігаційних систем наземних роботів, можуть використовувати відносні або абсолютні датчики. Відносні датчики відносяться до типів, які зазвичай є внутрішніми для робота, і його вимірювання передається до іншої системи. Абсолютні датчики забезпечують вимірювання відносно зовнішньої або глобальної системи відліку[12]. Ідея, представлена тут, полягає в тому, щоб забезпечити систему зору на борту робота аеронавігатора як відносного датчика, і з'єднати цю інформацію з абсолютним положенням робота на землі, щоб досягти абсолютного вимірювання положення перешкод. Таким чином, можна отримати механізм спільної навігації та уникнення перешкод, що використовує неоднорідність змішаної робототехнічної системи.

Для цієї системи є дві основні цілі: перше - отримати відносну відстань від наземного робота до будь-якої невідомої перешкоди, що оточує його, і тим самим гарантувати безпечну навігацію до цілі або шляхової точки. Другий - отримати абсолютне положення всіх перешкод, виявлених під час навігації, і побудувати карту з їх локалізацією; це означає наявність переліку географічного положення перешкод[13]. Під час дослідження статей, було виявлено, що роботи використовували комбінацію

антенних камер для підходу до цілей, але не було роботи, яка б використовувала лише одну антенну камеру для виявлення та уникнення перешкод.

Однією з переваг використання наземної навігаційної системи є те, що поле зору безпілотною робота є динамічним. Це означає, що, контролюючи висоту та відносне положення штату, робот на певному етапі може виконувати псевдо масштаб на перешкоді або будь-якому цікавому об'єкті, а також розвідку зон за межами об'єктів. Крім того, також можна визначити важкий рельєф місцевості, ґрунтові отвори або негативні перешкоди, а також інші непередбачені навігаційні перешкоди в оточенні безпілотною наземного робота[14]. Ця співпраця гарантує безпеку цієї системи, в той час як вона виконує інші завдання перевірки. Нарешті, система не потребує попередніх знань з навколишнього середовища, і вона може охоплювати великі навігаційні периметри.

Система бездротової навігації розподіляється на кілька етапів. На першому етапі роботизована система та перешкоди на шляху роботів ідентифікуються шляхом обробки аерофотознімків, після чого застосовуються методи, що базуються на потенційних полях, для забезпечення простої навігації та уникнення перешкод. Після цього запропонована архітектура дозволить побудувати локальну карту та отримати географічне розташування перешкоди, яку бачать БПЛА. Також кожна перешкода, яка буде знайдена, може бути запам'ятована, і може бути побудована глобальна карта з усіма перешкодами.

1.2 Формулювання та вирішення проблеми аеронавігації безпілотною апарату

У цьому підрозділі вводиться проблема з теоретичної точки зору. По-перше, дано геометричний опис проблеми, а також співвідношення між різними еталонними кадрами. Потім запропоновано рішення на основі кінематики антенно-земної системи та деяких припущень. Як згадувалося раніше, існує дві основні цілі системи аеронавігації:

- 1) Ухилення від перешкод: забезпечте безліч навігаційних шляхів для наземних роботизованих систем під час виконання своєї місії через візуальні відгуки від недорогих мініатюрних БПЛА.
- 2) Відображення перешкод: отримання глобальної позиції перешкод і побудова географічної карти з її допомогою[15].

1.3 Координатні кадри та визначення

По-перше, координатні системи визначаються за допомогою правил правої руки. Цей крок є важливим, його не слід уникати, оскільки ці визначення використовуються при розробці підсистеми управління, навігації та контролю. Координатні кадри з усіх фізичних тіл усередині робочої області визначаються правилом правої руки[16]. Корисні кадри, прийняті робототехнічною системою показані на рисунку 1.1.

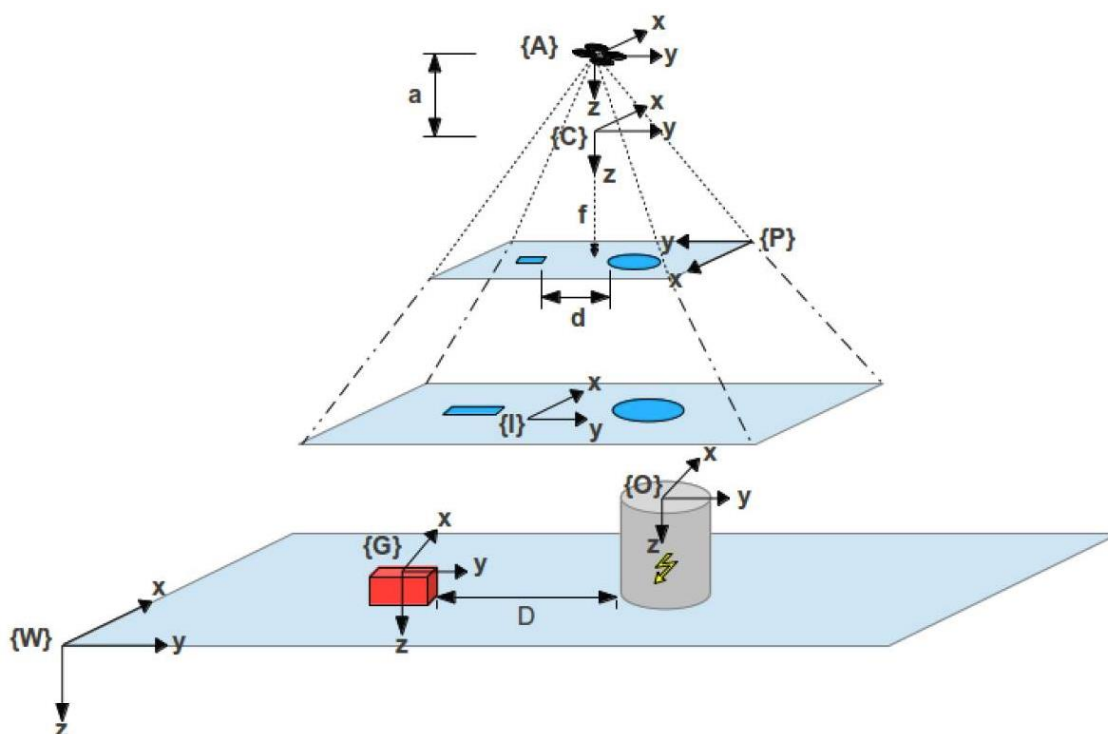


Рисунок 1.1 – Прийняття робототехнічною системою корисних кадрів

Номенклатура, що використовується в системах координат, полягає в наступному: W (світовий кадр), G (земний кадр), O (кадр перешкод), I (площина зображення), P (площина пікселів), C (кадр камери) і A (повітряний кадр). Всі

координатні кадри визначаються як тривимірні (3D), за винятком площини зображення та площини пікселів, які є двовірними (2D)[17].

Мета полягає в тому, що БПЛА слідує за наземним роботом і спускається на мінімальну висоту над ним. Ця мінімальна висота повинна забезпечувати певні властивості, тому робот повинен завжди знаходитись в межах камери. Таким чином, будь-яка перешкода поблизу може бути легко ідентифікована. Тому передбачається, що БПЛА має підсистему (управління, навігація та керування), яка дає йому змогу стежити за наземним роботом. Окрім того, камера ідентифікує лише одну єдину перешкоду[18].

1.4 Геометричний режим датчика

Модель датчика може бути відображена фізичною моделлю (більш складною, розглядаючи високо нелінійні рівняння) або аналітично (приблизні, поліноміальні функції). Окрім того, модель датчика, тобто цифрова камера, може бути виражена як прямо (зображення на землю), так і обернено (земля до зображення). У цій роботі розглядається пряма фізична модель. Почнемо з моделі з камерою з точністю від рівняння 1.1, де $(u, v, 1)^T \in 2D$ точкою в піксельному кадрі, і $(X, Y, Z, 1)^T \in 3D$ точкою у робочому просторі робота. Проекція в перспективі масштабується з коефіцієнтом s [19].

$$\underbrace{s \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}}_{s \times p} = \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_K \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t3 \end{bmatrix}}_{[R/T]} \underbrace{\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}}_P \quad (1.1)$$

1.4.1 Внутрішні параметри

Внутрішні параметри камери розглядаються першою матрицею з рівняння 1.1, позначеної як K . За допомогою цих параметрів можна встановити зв'язок між коефіцієнтами пікселів у зображенні та їх положенням у системі відстеження камери. Внутрішні параметри, що представляють інтерес (відомі апіорі з специфікації камери),

є: f , фокусна відстань камери; c_x, c_y , які є основними точками зображення (тобто визначення координат пікселів із центру) та коефіцієнтів викривлення об'єктива[20].

1.4.2 Нестандартні параметри

Сторонні параметри, з іншого боку, визначають положення і орієнтацію камери з посиланням на міжнародну систему координат. Положення перешкод у міжнародній системі координат можна отримати двома способами:

- 1) Отримання позиції перешкоди у міжнародній координатній сітці та застосування всіх геометричних перетворень (наприклад, прямої моделі камери) від площини пікселів до міжнародної системи відліку.
- 2) Отримати відстань від наземного робота до перешкоди в метрах у площині зображення та обчислити положення перешкоди в міжнародній системі відліку від положення та орієнтації робота у міжнародній системі відліку (за допомогою GPS). При цьому, немає необхідності переводити координати міжнародної координатної сітки[21].

Запропонований підхід використовує методики, описані у пункті 1.2. Таким чином, єдиним зовнішнім параметром, який використовується та необхідний, є орієнтація з камери, яка забезпечує геометричні коригування зображення, зняті камерою, і доставлені з БПЛА.

З рисунка 1.1 можна помітити, що опорний кадр на камері зміщується з кадру камери по осі z . Це переміщення являє собою відстань від камери до центру ваги БПЛА. Позиція камери стосовно БПЛА може бути виражена як:

$$\begin{bmatrix} x_C^A \\ y_C^A \\ z_C^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Крім того, позиція БПЛА вже дана у міжнародній системі координат (тобто, надається GPS). Таким чином, позиція камери у міжнародній системі відліку визначається рівнянням 1.2[22].

Позиція та орієнтація наземного робота та положення перешкод в системі відбитків зображення вилучаються та проєктуються у кадрі пікселів, застосовуючи алгоритми та методи комп'ютерного бачення. Положення перешкоди або позицію робота можна отримати, застосовуючи цю просту перспективну проєкцію в рівнянні 1.3, його відносне положення один до одного, отримане шляхом простого віднімання, може бути використане, коли навігація є чисто реактивною[23].

$$\begin{bmatrix} x'_o \\ y'_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta) & \cos(\phi)\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p z_A \\ y_p z_A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Кут між перешкодою та наземним роботом у його системі відліку, позначений як γ , може бути отриманий шляхом вирахування курсу прямування робота в площині камери і позначається як α з кута перешкоди, також на площині камери і позначається як θ . Обидва ці кути можна отримати, використовуючи рівняння 1.3. Це краще ілюструється на рисунку 1.2.

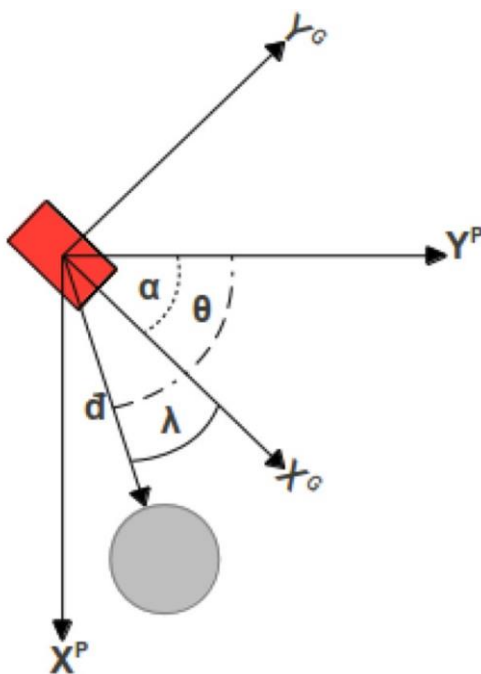


Рисунок 1.2 – Геометрія курсу наземної роботизованої системи. Кут інтересу визначається $\gamma = \theta - \alpha$.

Нарешті, останньою метою системи є побудова глобальної карти з усіма перешкодами на шляху наземного робота. Кожна перешкода, яку ідентифікує камера

БПЛА, має географічне посилання та націлене на географічну карту[24]. Таким чином, положення перешкоди у міжнародній системі координат задається:

$$\begin{bmatrix} x_o^w \\ y_o^w \\ z_o^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o^I - x_G^I \\ y_o^I - y_G^I \\ z_o^I - z_G^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_G^w \\ y_G^w \\ z_G^w \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

1.4.3 Спотворення об'єктива

Крім того, модель Брауна-Конраді застосовується для виправлення спотворення об'єктива. Модель спотворення об'єктива задається двома коефіцієнтами спотворення: радіальним (k_1, \dots, k_n) і тангенціальним (d_1, \dots, d_n) . Таким чином, розглядаючи $(x_p', y_p')^T$, точка неспотвореного зображення, і $(x_p, y_p)^T$, спотворена точка зображення, виправлене рівняння[25]:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2d_1 + 2p_1 x_p' y_p' + p_2 (r^2 + 2x_p'^2) \\ y_p' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 (r^2 + 2x_p'^2) + 2p_2 x_p' y_p' \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

1.5 Особливості екстракції

Як уже згадувалося, обриси, добуті з допомогою камери, відправленої на БПЛА, були отримані шляхом застосування методів комп'ютерного зору. У цьому випадку багатокутник створений комп'ютерною системою апарата визначається як геометрична форма з більш ніж трьома вершинами. Ця процедура виконується шляхом знаходження на зображенні обробленого набору контурів, що стосуються форми наземного робота або будь-якої площини приземлення[26]. Послідовність обробки зображень наведена на рисунку 1.3. Поріг застосовується до зображення сірого кольору, після чого з'являється слабкий детектор краю. Після ідентифікації багатокутника його центроїд можна легко отримати. Крім того, орієнтація наземного робота по відношенню до зображення виходить через контур головних моментів інерції[27].

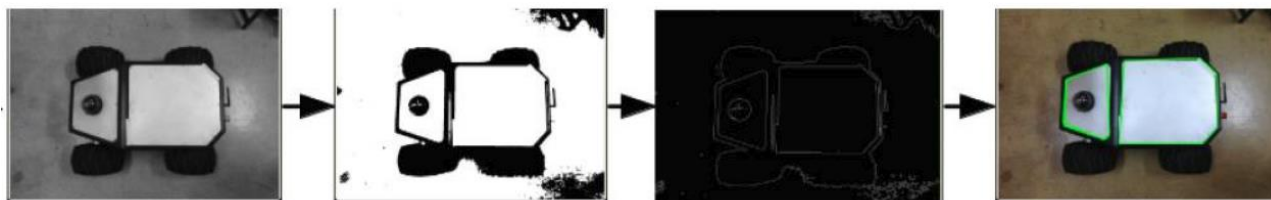


Рисунок 1.3 – Особливості екстракції процедури для наземного робота.

Що стосується перешкод, то для ідентифікації в цій роботі були розглянуті ті, що мають круглу та квадратну форму (наприклад, силоси, водні або газові баки, контейнери). Обриси квадрата витягуються аналогічно вищезгаданій процедурі. Проте, представлені круглі верхні обриси, використовують перетворення Хафа. Слід також підкреслити, що перешкода визначена з її верхнього вигляду, оскільки камера спрямована вниз. Перед експериментами деякі параметри повинні бути налаштовані вручну, як, наприклад, порогові значення, які необхідно регулювати відповідно до погодних умов, зокрема світлового впливу[28].

1.6 Оцінка позиції

Цей розділ описує методи, що використовуються для оцінки позиції наземного робота та положення перешкоди. Спочатку позицію робота в міжнародній координатній сітці оцінюється шляхом з'єднання одометрії, IMU і GPS з використанням розширеного фільтра Калмана, після цього інший фільтр Калмана використовується для оцінки положення перешкод за допомогою результатів алгоритму обробки зображень[29].

1.6.1 Оцінка земної робочої позиції

Проблема оцінки позиції транспортного засобу може бути визначена як розрахунки, необхідні для оцінки стану транспортного засобу на основі показників з кількох датчиків. Ця проблема вирішується за допомогою розширеного фільтра Калмана, який виробляє в момент часу k мінімальну середню оцінку квадрата похибки

$\hat{s}(k|k)$ вектора стану $s(k)$. Ця оцінка є результатом об'єднання прогнозованої оцінки стану[30] $\hat{s}(k|k-1)$ з спостереженням $z(k)$ вектора стану $s(k)$.

- Модель автомобіля

Модель автомобіля являє собою тривимірну позицію (положення та орієнтацію). Ця позиція може бути параметризована як $s = [t, \psi]^T = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$, де $t = [x, y, z]^T$ є системою координат UTM і відносна висота транспортного засобу, і $\psi = [\varphi, \theta, \psi]^T$ є кути Ейлера на вісь X-Y-Z.

Для того, щоб використовувати розширений фільтр Калмана, для оцінки позиції робота, необхідно виразити позицію як багатовимірний Гауссовський розподіл $s \sim N(\mu, \Sigma)$. Цей розподіл визначається через вектор-стовпець з шістьма елементами μ , що представляють середні значення позицій. Крім того, шість на шість симетрична матриця Σ являє собою коваріацію[31].

$$\begin{aligned} \mu &= [E[x], E[y], E[z], E[\varphi], E[\theta], E[\psi]]^T \\ \Sigma &= \begin{bmatrix} \text{Cov}[x, x] & \text{Cov}[x, y] & \dots & \text{Cov}[x, \psi] \\ \text{Cov}[y, x] & \text{Cov}[y, y] & \dots & \text{Cov}[y, \psi] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}[\psi, x] & \text{Cov}[\psi, y] & \vdots & \text{Cov}[\psi, \psi] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Тепер необхідно визначити нелінійну функцію щільності умовної ймовірності $f(s(k), u(k+1))$ яка являє собою ймовірність прогнозованої позиції з урахуванням поточного вектора стану $s(k)$ і вектор управління $u(k+1)$.

$$s(k+1) = f(s(k), u(k+1)) \quad (1.7)$$

Також дуже важливо визначити глобальне перетворення наземного робота T_{UGV} що складається з матриці обертання $R(\Psi)$ отриманої з кутів Ейлера, і переміщення t у глобальну систему відліку[32].

$$T_{UGV} = [R(\Psi)t] \quad (1.8)$$

- Вимір величин

Позиція робота оновлюється відповідно до показань з трьох різних датчиків: внутрішня одометрія робота, IMU сенсор і GPS. Таким чином, необхідно створити

модель, яка зв'язує вимірювання кожного датчика з глобальною позицією мобільного робота. Як це було зроблено з позицією транспортного засобу, спостереження датчиків повинні бути виражені як розподіл Гауса; це означає, що вони повинні забезпечувати вектор середніх значень та симетричну матрицю коваріацій[33].

Як це було зроблено для оціночної позиції наземного робота, трансформація T_i визначається для кожного виміру.

- Одометрія

Одометрія забезпечує відносне положення та обмеження орієнтації. Щоб мати можливість використовувати ці вимірювання в глобальній системі відліку, перетворення між двома послідовними показниками одометрії ($T_{or}(k) \rightarrow T_{or}(k+1)$) обчислюється, і отримана трансформація застосовується до попередньої оціночної позиції робота[34].

$$T_o(k+1) = T_{UGV}(k)T_{or}(k)^{-1}T_{or}(k+1) \quad (1.9)$$

- GPS

Показання з GPS перетворюються на UTM, використовуючи формули USGS Bulletin 1532, і вони використовуються для забезпечення глобального обмеження позиції. Проте, GPS не надає інформації для орієнтації робота, тому слід враховувати лише позицію[35].

$$T_{GPS}(k+1) = [R(\Psi_0)t_{GPS}(k+1)] \quad (1.10)$$

- IMU

Дані IMU попередньо обробляються для з'єднання гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів. Для того, щоб забезпечити глобальне обмеження орієнтації робота, з цих сенсорів позицій або переміщень[36].

$$T_{IMU}(k+1) = [R(\Psi_{IMU})t_o] \quad (1.11)$$

З визначеними перетвореннями можна визначити функцію щільності імовірності для кожного з них. У всіх випадках матриця H (необхідна для обчислення оцінки розширеного фільтра Калмана) буде одинична матриця розмірності шість. Для GPS та IMU коваріації, пов'язані з обертом або переміщенням, які не надаються, будуть замінені дуже високими значеннями.

Ці моделі та фільтр Калмана реалізуються за допомогою Байєсівської бібліотеки фільтрів, які повністю інтегровані в середовище ROS. Оцінювана позиція оновлюється за попередньо визначеною частотою з даними, доступними на той час; це оцінка позиції, яку потрібно виконати, навіть якщо один датчик перестає надсилати інформацію. Також, якщо інформація отримана після тайм-ауту, її не враховують[37].

На рисунку 1.4 показана тестова траєкторія, виконана роботом у модельованому середовищі. Позиції були переведені на міжнародну систему відліку, щоб мати змогу порівнювати їх. Можна спостерігати, що розширений фільтр Калмана виконує корекцію положення з одометрії, тим самим зменшуючи середню квадратну помилку в порівнянні з реальною позицією, отриманою безпосередньо з симулятора.

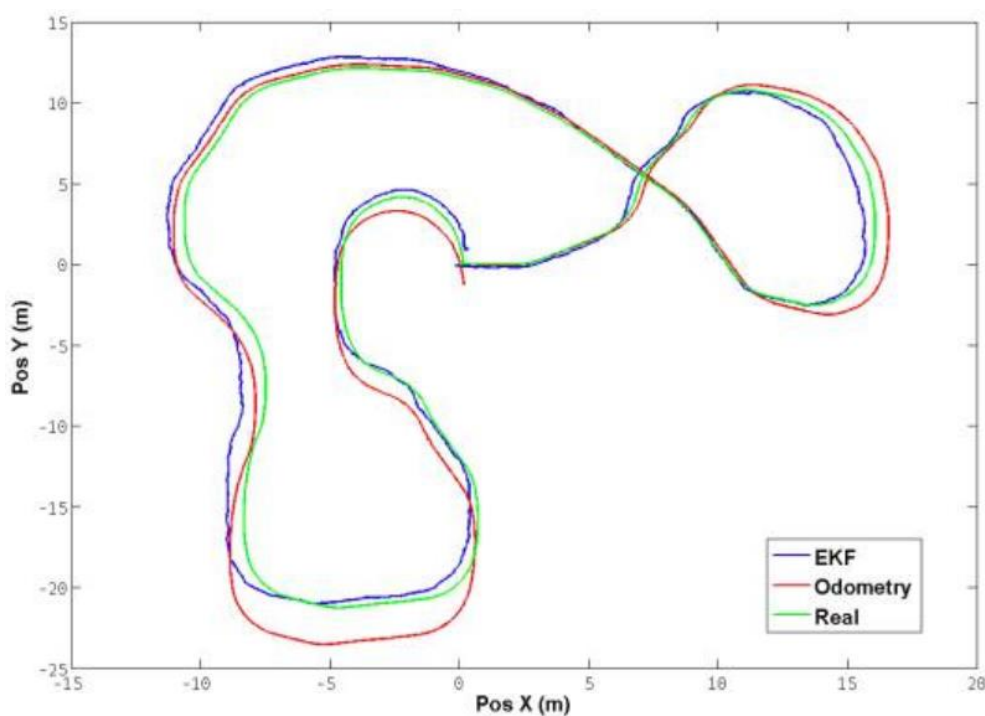


Рисунок 1.4 – Тестова траєкторія для розширеного фільтра Калмана.

1.6.2 Оцінки трансформації і оцінки перешкод

Оцінюючи позицію робота, можна застосувати обробку та перетворення, описані в попередньому розділі, для отримання глобальної позиції перешкоди. Для кожного обробленого зображення одержується перетворення, подібне до описаного у рівнянні 1.4, і застосовується до розрахункового положення робота. Це дає кілька вимірювань положення кожної виявленої перешкоди. Оскільки глобальна позиція наземного робота отримується в координатах UTM, загальна позиція перешкод задана в тій же системі відліку. Усі позиції зберігаються, а потім обчислюється середнє значення та стандартне відхилення[38].

1.7 Навігація та контроль

Цей розділ описує алгоритми та закони управління, що використовуються для навігації як наземних, так і повітряних роботів. Добре керована навігація потенційних полів використовується для управління земним роботом, а БПЛА працює в телеопераційному режимі.

1.7.1 Повітряний робот

Основним завданням БПЛА є слідкування за наземним роботом і прокладення найоптимальнішого шляху для нього в полі зору його камери. Це забезпечується шляхом залучення пілота людини, який керує повітряним роботом в телеопераційному режимі. Тим не менш, існує система управління середнього рівня, що працює для полегшення роботи повітряного робота. Система управління середнього рівня забезпечує контроль висоти на основі показників вимірювача ультразвукового діапазону, а також забезпечує алгоритм стабілізації позиції, який намагається утримати робота настільки стійко, наскільки це можливо, для отримання кращого зображення, це техніка стабілізації на основі злиття оптичного потоку та читання показників IMU[39]. Оскільки динаміка робочого БПЛА набагато швидше, ніж наземного робота, існує

кілька проміжків часу, коли БПЛА висить у повітрі; в ті моменти часу алгоритм стабілізації доводить свою корисність.

Альтернативно, можна керувати надземним роботом, використовуючи станцію наземного управління (СНУ), який отримує телеметрію та зображення з чотирьох роторів, перш ніж використовувати алгоритм керування положенням для підтримки цілі в центрі зображення та відправлення команд для керування рухом літального апарату (кут руху ψ та кут нахилу θ). Ці керуючі команди надсилаються до наземного робота зазвичай 30 разів на секунду, щоб отримати плавні рухи[40]. Крім того, СНУ використовується для налаштування та контролю БПЛА.

1.7.2 Наземний робот

Наземний робот контролюється за допомогою ROS-реалізації поведінки руху. Ця технологія навігації потенційних полів ґрунтується на визначенні простої моделі транспортного засобу, яка представляє собою масове наближення точки. Транспортний засіб описується своєю позицією, орієнтацією та швидкістю. Його швидкість модифікується шляхом застосування сил або прискорень, обмежених максимальним силовим параметром. Це дозволяє працювати з простою обчислювальною моделлю і не залежить від схеми руху.

Позиція транспортного засобу визначається чотирма векторами, перший - позиція робота, а три інші є орто-нормальними векторами, які визначають орієнтацію (вперед, вбік та вгору), приймаючи вісь X як нормалізований напрямок швидкості або прямого вектора. Оскільки вважається, що наземний робот рухається в двовимірному просторі, вісь Z буде постійною, а Y буде результатом перемноження X і Z (або вперед і вгору)[41]. Сигнал керування, отриманий з алгоритму, - це один вектор, який представляє рухову силу, що виникає внаслідок будь-якої поведінки (тобто, ухилення, пошук, вирівнювання). Цей вектор додається до поточної швидкості, а потім перетворюється, щоб бути переведеним у систему відліку транспортного засобу.

Згодом він перетворюється на два керуючі сигнали - лінійні та кутові швидкості, які відправляються в систему керування наземного робота.

Пошукова система намагається керувати транспортним засобом на заздалегідь визначену позицію в міжнародній системі координат. Система регулює робочу швидкість наземного робота таким чином, щоб вона була у напрямку до цілі; бажана швидкість - це вектор, визначений з позиції наземного робота до цілі з максимальною швидкістю, а вектором керування є різниця між цією бажаною швидкістю та поточною швидкістю робота[42]. Якщо використовується лише пошукова система, робот пройде «крізь» ціль, а потім повернеться назад. Прибуття робота схоже на пошук цілі, але він вмикає гальмівну систему, коли транспортний засіб знаходиться на заздалегідь визначеній відстані до цілі, таким чином, робот зупиняється біля цілі. Рисунок 1.5 показує роботу алгоритму «шукати і уникати», з їхніми результуючими векторами керування та допоміжними елементами, які використовуються для їх обчислення.

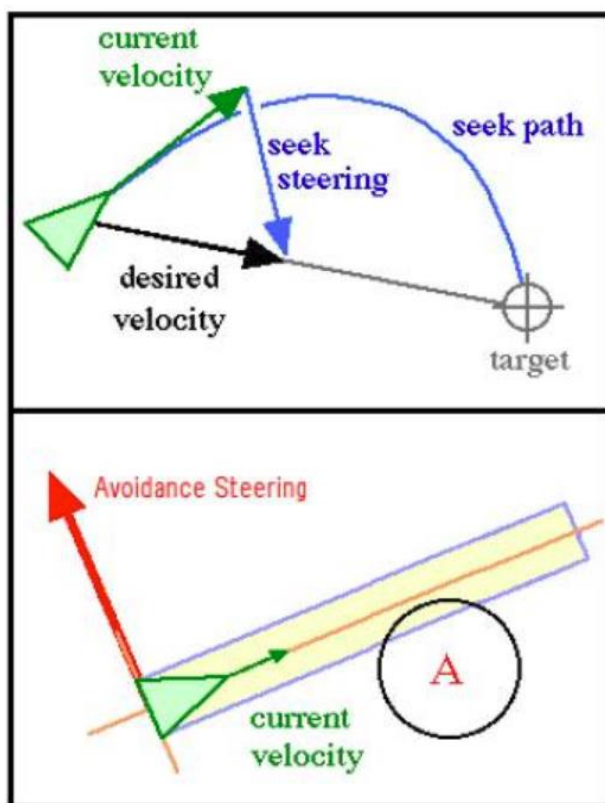


Рисунок 1.5 – Система поведінки. Показано роботу алгоритму (шукати та уникати) та його відповідні вектори.

Поведінка із запобіганням має на меті забезпечити транспортний засіб системою маневрування в середовищі, де можуть виникнути перешкоди; вона приймає дії лише тоді, коли виявлена перешкода перед роботом, а це означає, що якщо він рухається паралельно стіні, то алгоритм уникнення не здійснить жодних дій. Основний алгоритм передбачає, що і транспортний засіб[43], і перешкоди - сфери, хоча варіації можуть бути зроблені для врахування форми, а потім розширює обмежувальну сферу робота, щоб створити уявний циліндр, що лежить уздовж передньої осі робота, довжина циліндра залежить від швидкості руху робота та його здатності керувати напрямком. Потім алгоритм обчислює, чи перетинає будь-яку із зазначених перешкод циліндр робота. Якщо немає зіткнення, повертається нульовий вектор; якщо виявляється зіткнення, центр перешкоди проектується на бічній осі транспортного засобу і виконується поворот руля у протилежному напрямку[44]. Якщо виявлено дві або більше перешкоди, найближча до транспортного засобу переважає решту. Дві поведінки (шукати і уникати) можуть бути об'єднані шляхом додавання рухових сил. Також можна надати додаткові пріоритети тим чи іншим, шляхом здійснення зваженого додавання.

1.8 Експерименти

У цьому розділі представлені результати, отримані з розглянутої аеро-наземної системи. Підходи, описані в попередніх розділах, були вперше реалізовані в середовищі моделювання, а потім - на реальних роботах. Використана архітектура програмного забезпечення дозволяє використовувати одну й ту саму реалізацію в обох середовищах, але було необхідно використовувати реалістичне моделювання всієї системи. По-перше, використовувався чотирироторний повітряний робот, а також наземний робот. Крім того, моделювання датчиків, що включають типові джерела помилок, було додано до обох моделей роботів, а також модель камери на борту БПЛА[45]. Зробивши це, гарантується, що моделювання та реальні результати є сумісними та що алгоритми можуть бути переведені на справжніх роботів. Симульовані та реальні середовища показані на рисунку 1.6.

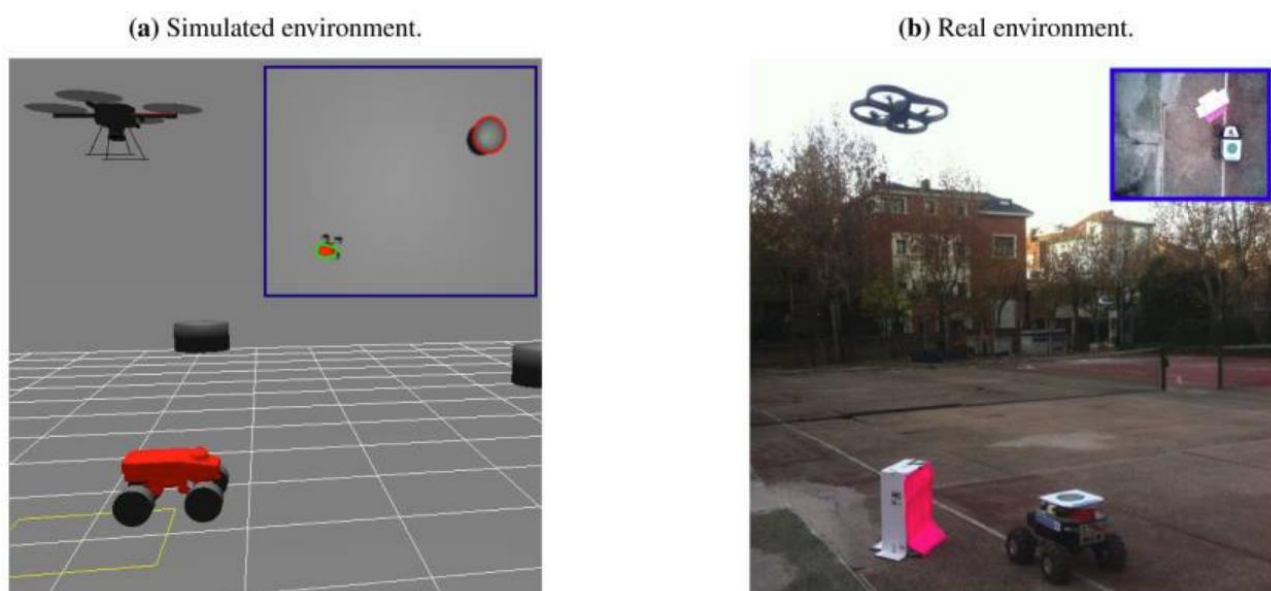


Рисунок 1.6 – БПЛА та наземний робот в запропонованих середовищах. Модельоване середовище (а). Реальне середовище (ю). Сині квадрати на кожному малюнку показують зображення, зняте камерою на борту БПЛА[46].

1.8.1 Симуляції

Два основних випробування були виконані в модельованому середовищі. Перший складається з єдиного маневру для виявлення та ухилення від перешкод, це робиться для перевірки кожної частини запропонованого рішення.

На рисунку 1.7 показана траєкторія, виконана для першого тесту. Позиція наземного робота в UTM отримується з розширеного фільтра Калмана. Положення перешкоди розраховується з аерофотозйомки та відповідних перетворень, як це було описано в попередньому розділі. Загальна пройдена відстань становила 16,9 метра і була пройдена за 25 секунд[47].

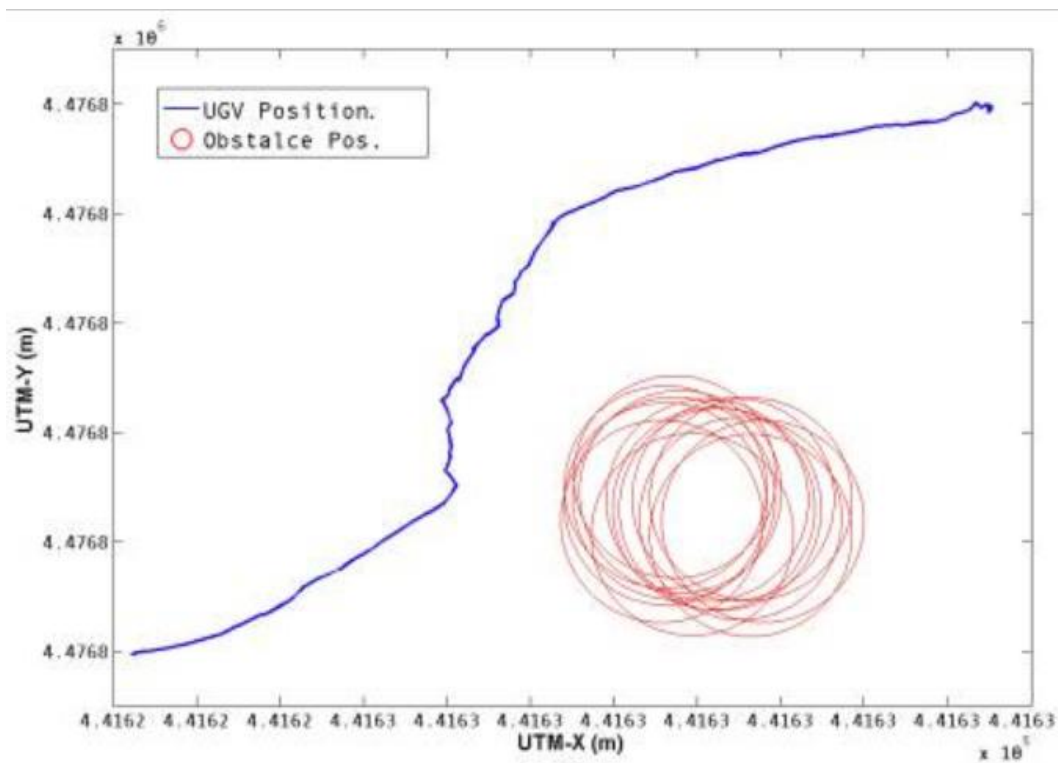


Рисунок 1.7 – Уникнення єдиної перешкоди. Показана траєкторія наземного робота під час виконання маневру з ухиленням виявленої позиції перешкоди.

На рисунку 1.8 показано, як кожна позиція була отримана, перетворення з позиції робота до положення перешкоди отримано відповідно до рівняння 4 і представлено синіми стрілками. Одержане положення перешкод у міжнародній системі координат представлено червоними колами. Як тільки ця перешкода залишається позаду, її позиція більше не представляє інтересу, і вона не береться до уваги. Можна помітити, що існує розосередження спостережень позиції перешкод, так що це становить інтерес, щоб мати характеристику отриманих позицій перешкод[48].

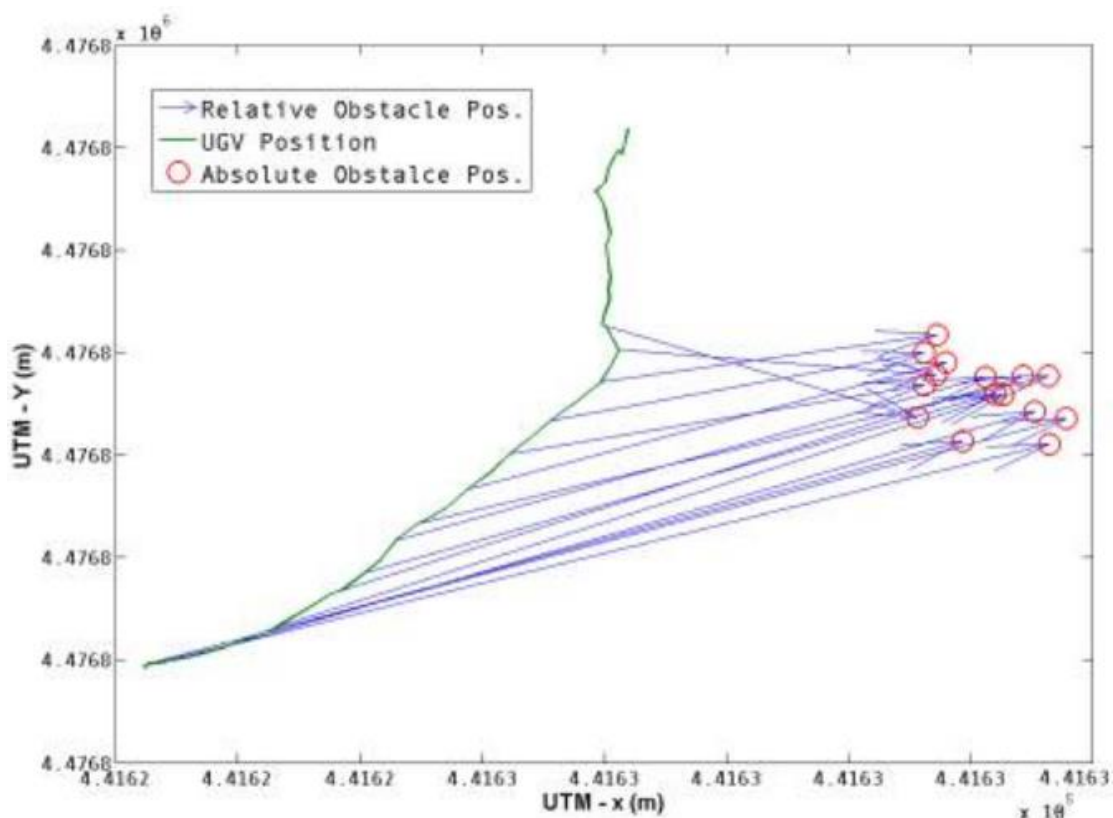


Рисунок 1.8 – Оцінка перешкод. Зелена лінія позначає позицію наземного робота. Сині стрілки визначають перетворення з кожної позиції робота до центру перешкоди, позначеної червоними колами.

На рисунку 1.9 показана реальні позиції перешкод та позиції отримані системою, переведені на міжнародну систему відліку. Середня квадратична похибка та стандартне відхилення були розраховані та наведені в таблиці 1.1. Можна побачити, що обидва значення мають допустимі діапазони помилок. Середня квадратична похибка складає менше 20% від діаметра перешкоди, яка становить 1 метр, у вісі X і 30% на вісь Y[49].

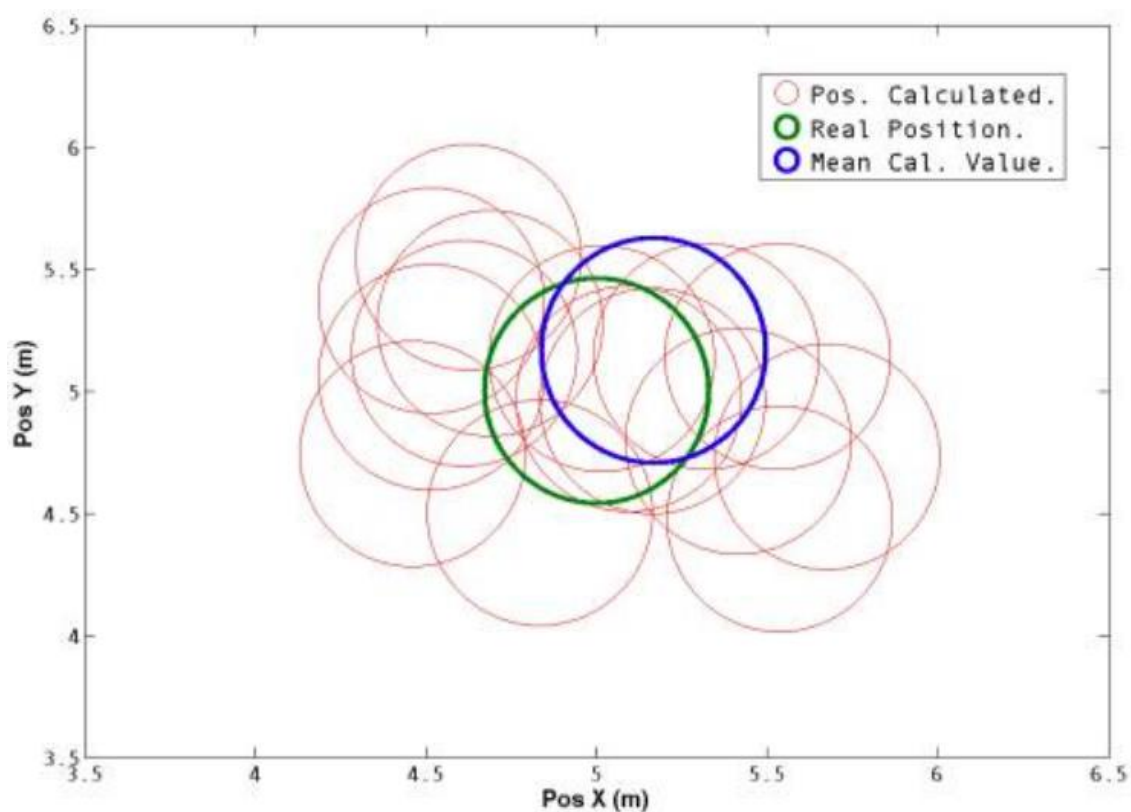


Рисунок 1.9 – Позиція перешкоди (реальна або приблизна). Червоні кола означають оцінювані положення перешкод. Зелений показує реальне положення перешкоди, а синій - середнє значення розрахованих позицій. Всі позиції були переведені на загальну систему відліку.

Таблиця 1.1 – Середня квадратична помилка та стандартне відхилення розрахункової позиції перешкод.

	Середня квадратична помилка	Стандартне відхилення
Вісь X	0.1954	0.4236
Вісь Y	0.3333	0.3053

Отримавши позицію перешкоди, алгоритм навігації використовує цю інформацію для виконання маневру з запобігання зіткнення відповідно до способів поведінки пошуку та уникнення перешкод, описаних у попередньому розділі. Результатом цього навігаційного алгоритму є команда системі швидкостей на кожному кроці часу.

Команда перетворюється на опорний кадр, перетворюється в лінійну та кутову швидкість і відправляється в систему керування роботом. На рисунку 1.10 показані команди зміни швидкості, сформовані для цього випробування, разом із траєкторією робота та положенням перешкоди[50].

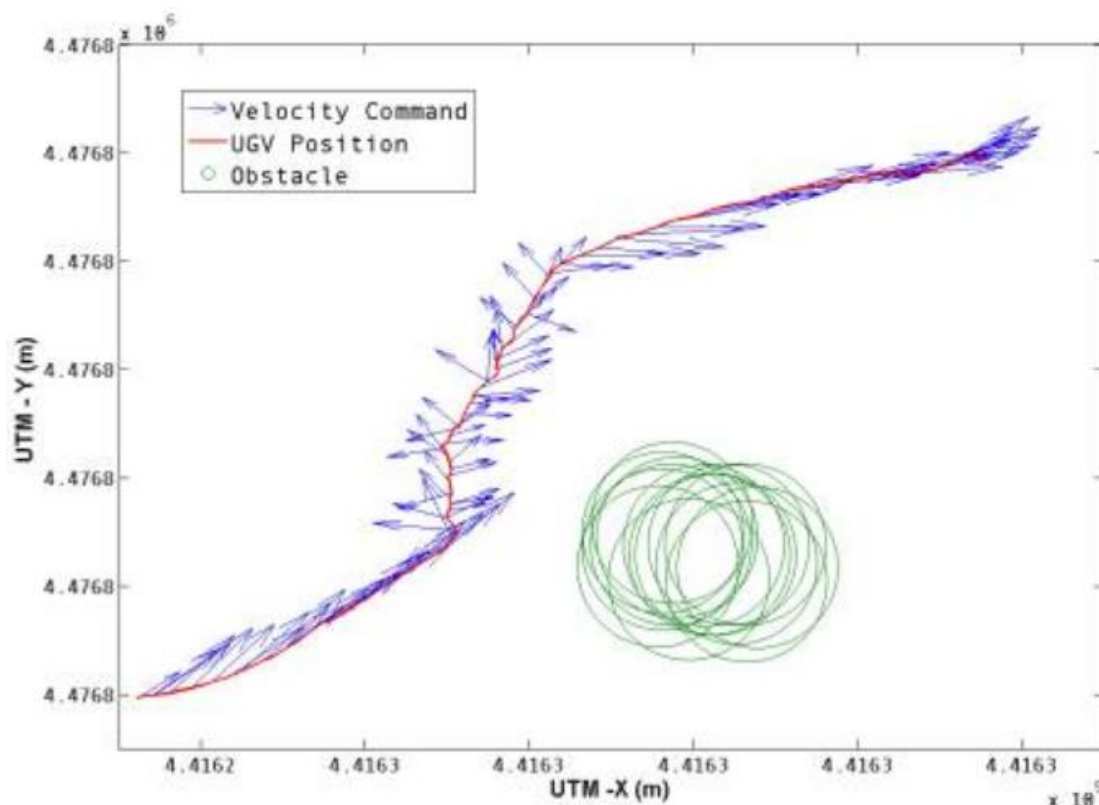


Рисунок 1.10 – Команди зміни швидкості. Червона лінія описує траєкторію робота, а сині стрілки представляють команди зміни швидкості в кожному положенні робота.

Для другого випробування були визначені три шляхових пункти в середовищі з шістьма циліндричними перешкодами. Під час відвідування шляхових пунктів було виявлено деякі перешкоди, а відповідне ухилення виконувалося, якщо це необхідно. Рисунок 1.11 показує повну траєкторію, а також виявлені перешкоди. Було виявлено п'ять з шести перешкод, і всі три шляхових пункти були досягнуті успішно[51].

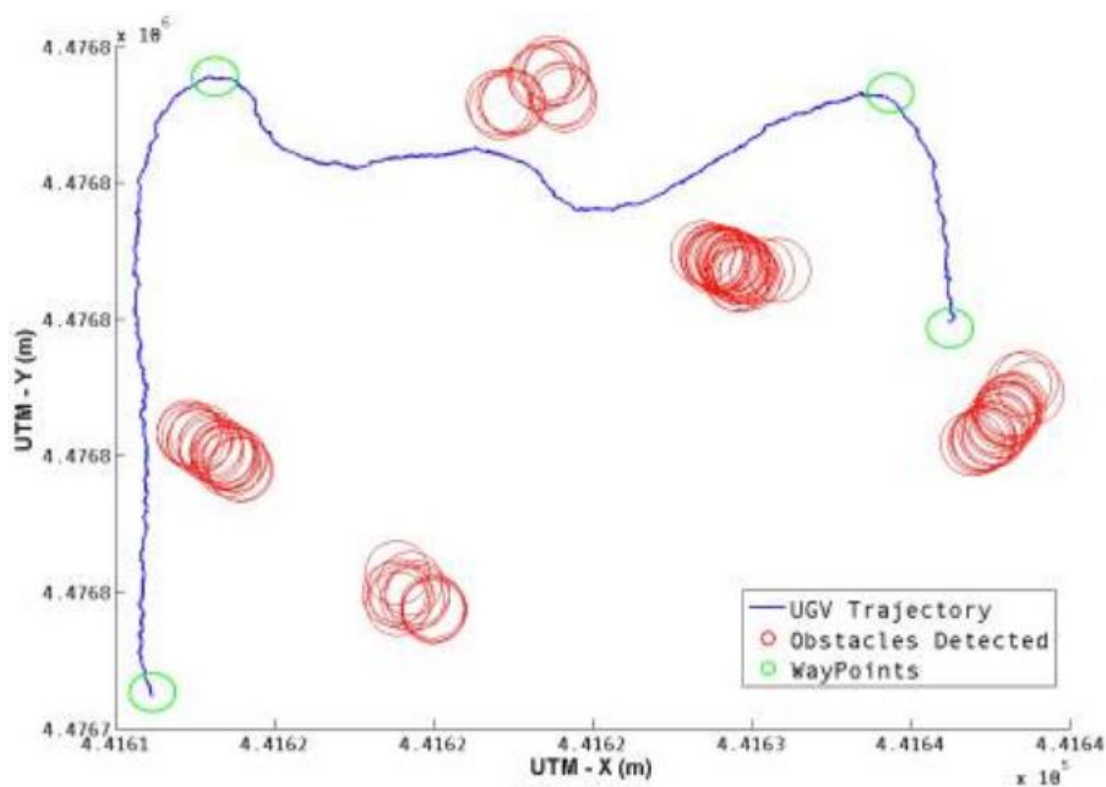


Рисунок 1.11 – Друга випробувальна траєкторія. Синя лінія описує траєкторію робота. Червоні кола являють собою перешкоди, які знаходяться на шляху, а зелені кола - це шляхові пункти

Позиція визначається в координатах UTM, як було описано в попередньому розділі. Оскільки значення, отримані для стандартного відхилення, у всіх випадках менше, ніж один метр, можна зробити висновок, що ці дані дають набір позицій перешкод, які можуть використовуватися для навігаційної системи. У таблиці 1.2 показано середнє значення та стандартне відхилення п'яти перешкод, виявлених під час випробування[52].

Таблиця 1.2 – Середнє значення та стандартне відхилення для всіх перешкод, виявлених у тестовій траєкторії.

	Середнє значення вісі X, м	Стандартне відхилення вісі X	Середнє значення вісі Y, м	Стандартне відхилення вісі Y
Перешкода 1	441637.8	0.4743	4476756.3	0.6360

Перешкода 2	441623.3	0.7489	4476768.4	0.5152
Перешкода 3	441629.4	0.4939	4476761.9	0.2612
Перешкода 4	441613.1	0.5246	4476755.1	0.4076
Перешкода 5	441619.3	0.4924	4476749.7	0.3820

1.8.2 Реальне середовище

Був розроблений та впроваджений набір тестів для перевірки доцільності роботи системи поза імітаційним середовищем. Перше випробування було орієнтоване на перевірку міжпроцесних комунікацій. Таким чином, тестовим дроном було виконано набір польотів, а дані з наземного робота та БПЛА були прийняті в режимі реального часу, використовуючи проміжну і програмну архітектуру, розроблену для цієї системи.

Другий тест проводився у зовнішньому середовищі. Його завданням було одержати реальні зображення від БПЛА і перевірити алгоритми виділення об'єктів. Для полегшення випробувань платформи, геометричний малюнок певної форми був нанесений на дах робота. Розроблена платформа має дві основні можливості: вона може використовуватися для зльоту та аварійних посадок, а також може транспортувати БПЛА, якщо вичерпався заряд батареї. Додатковою перевагою є те, що дизайн платформи полегшує відстеження робота і відрізняє його від інших об'єктів на землі. Нарешті, алгоритм навігації для наземного робота був протестований, використовуючи фіксовану ціль та віртуальну позицію перешкод. Набір зображень з цих попередніх тестів показано на рисунку 1.12[53].

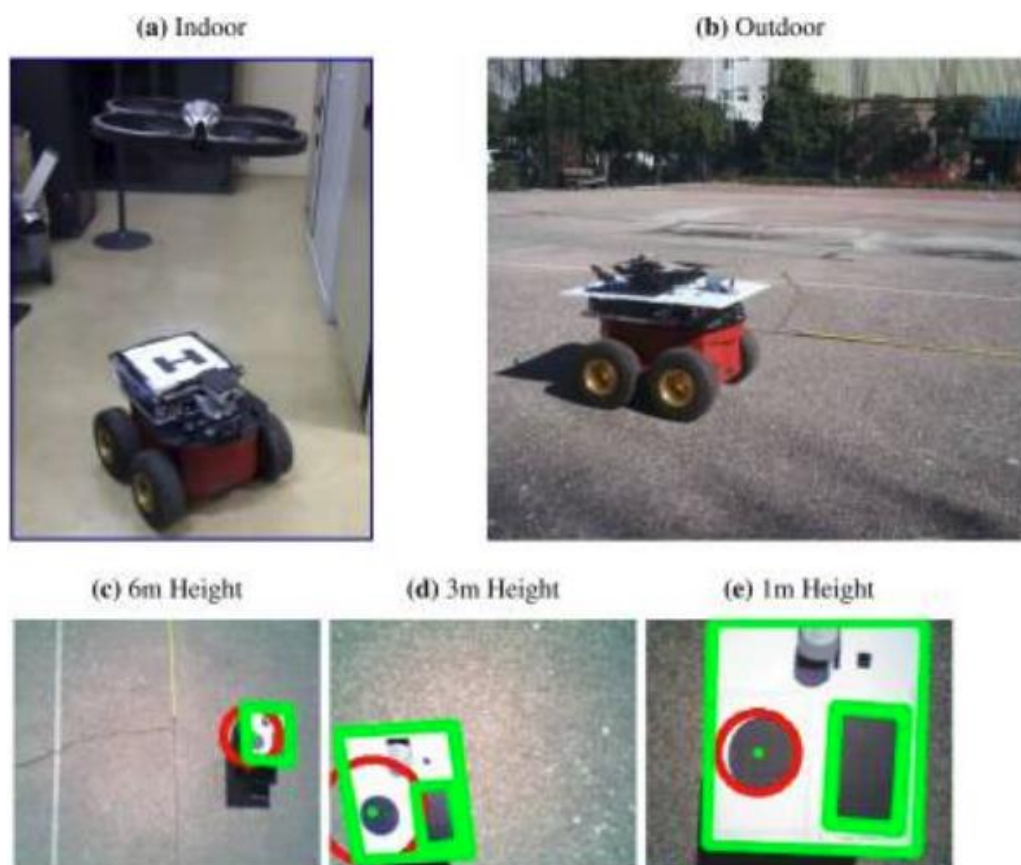


Рисунок 1.12 – Початкові тести з справжніми роботами: (а, б) Зв'язок та навігація. (с), (д) та (е) Аерофотознімки зроблені на різних висотах.

Під час випробувань, описаних раніше, швидкість зйомки та тривалість обробки, а також дані телеметрії як з наземного робота, так і з БПЛА були протестовані та виміряні. Вся обробка даних та команди, надіслані до навігаційної системи, також вимірювалися за своїм періодом часу. Результати всіх цих вимірювань наведені в таблиці 1.3[54].

Таблиця 1.3 – Частоти та час витрачений для потокової передачі та обробки зображень, та даних.

	Середня частота, Гц	Максимальний період, с	Мінімальний період, с
Потокове зображення	10	0.446	0.003
Телеметрія БПЛА	13	0.404	0.001

Телеметрія наземного робота	20	0.051	0.049
Навігаційна система наземного робота	10	0.103	0.096
Обробка зображень та даних	37	0.102	0.01

Можна помітити, що потокове зображення працює з середньою частотою 10 Гц, а всі інші часові проміжки або частоти швидші, ніж це значення. Відповідно до архітектури програмного забезпечення, контрольні та навігаційні системи наземного робота працюють на його бортовому комп'ютері, а отримання та обробка зображень виконується на базовій станції ПК. Крім того, між процесами зв'язку ядра обробляється ROS проміжного програмного забезпечення, що дозволяє системі працювати на тій же частоті, що і передача потокового зображення. Результати цих тестів показали, що алгоритми обробки повідомлень та обробки зображень є достатніми для здійснення безперешкодної навігації в режимі реального часу.

Для того, щоб виконати останній експеримент із повною системою аеронавігації. Набір перешкод було поміщено в різні позиції робочого середовища робота. Потім, набір попередньо визначених і фіксованих цілей було надано роботу, що гарантує, що для того, щоб прибути туди, він повинен уникати попередньо визначених перешкод.

Маневр уникнення перешкод був виконаний за допомогою алгоритму керування рухом. БПЛА вручну контролювався в режимі навігації над роботом, а зображення з аерофотозйомки були передані та оброблені за допомогою алгоритму розпізнавання об'єктів. Положення робота та перешкод було виділено з отриманого зображення, а інформація про положення перешкод, була надіслана до навігаційної системи робота. На рисунку 1.13 показана послідовність повітряних зображень, отриманих під час проходження робота по заданій траєкторії, з об'єктами ідентифікованими в кожному

кадрі, а також показана траєкторія, отримана за допомогою одометрії робота. Змінні, виміряні під час експерименту, показані в таблиці 1.4[55].

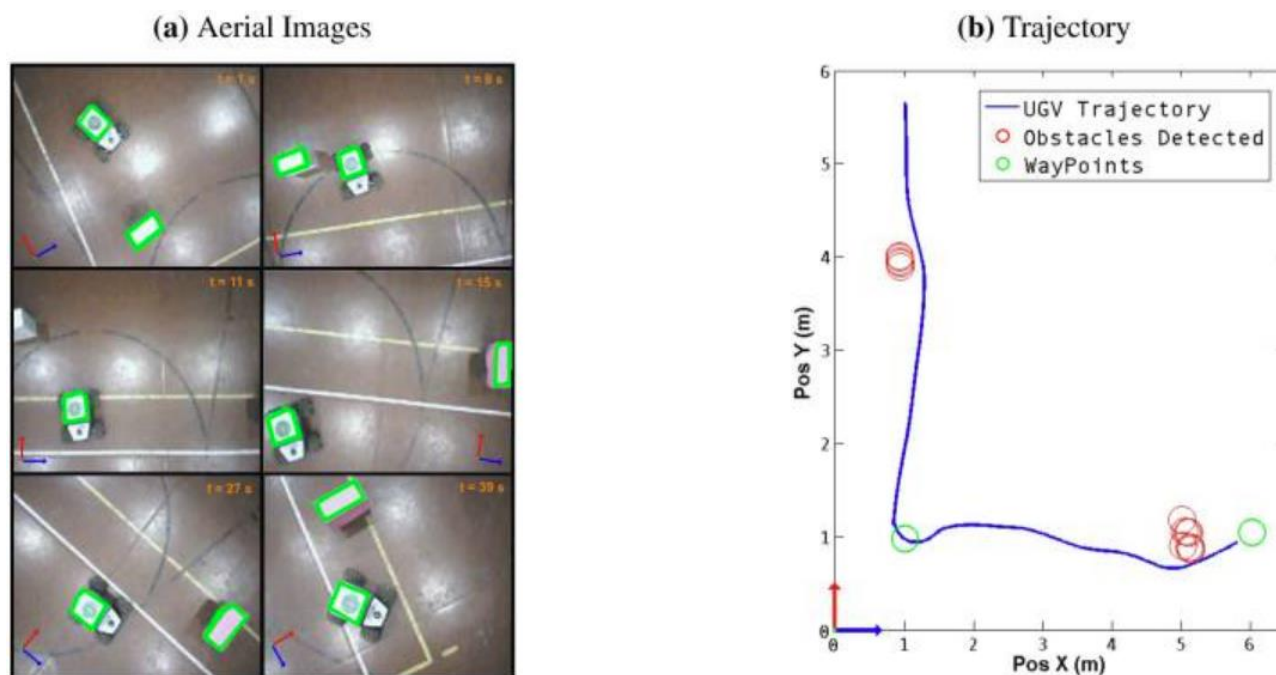


Рисунок 1.13 – Польові випробування: (а) послідовність зображень, отриманих від БПЛА, при виконанні маневру із запобігання зіткнення з перешкодами. Орієнтація представлена синьою та червоною стрілками для осей X і Y. (б) Траєкторія наземного робота відображена синім; додані додаткові позначки для цілі та перешкод

Таблиця 1.4 – Параметри траєкторії та додаткова інформація.

Час пройденої траєкторії:	39 с
Максимальна швидкість наземного робота:	0.3 м/с
Середня швидкість наземного робота:	0.2048 м/с
Максимальна висота роботи БПЛА:	4.812 м
Середня висота роботи БПЛА:	4.51 м
Загальна відстань пройденої траєкторії:	10.1999 м

Перешкоди були успішно виявлені та уникнуті з використанням запропонованої системи; середнє положення та стандартне відхилення спостережень наведені в таблиці

1.5. Слід підкреслити, що помилка в оціночному положенні перешкод була меншою, ніж 0,15 метра в останньому експерименті. Крім того, робот підтримував середню безпечну відстань від перешкод у 0,3 метра. Тому, незважаючи на внесену помилку положення перешкод, робот навряд чи зіткнеться з нею, через дотримання безпечної відстані між перешкодами.

Таблиця 1.5 – Середнє значення та стандартне відхилення для перешкод, виявлених під час проходження траєкторії.

	Середнє значення вісі X, м	Стандартне відхилення вісі X	Середнє значення вісі Y, м	Стандартне відхилення вісі Y
Перешкода 1	0.9896	0.0194	4.1373	0.0468
Перешкода 2	5.0930	0.1143	1.1158	0.0492

Гібридна робототехнічна система була розроблена та впроваджена для забезпечення безпечної навігаційної системи для робота, використовуючи антенний знімок з камери на борту БПЛА як єдине джерело інформації про навколишнє середовище. Система здатна здійснювати локальну навігацію та розвідку в режимі реального часу у великих напівструктурованих середовищах; вона може також побудувати точні карти з абсолютним положенням перешкод, знайшовши шлях між ними. Ці карти можуть бути використані для створення локального шляху планування або бути віддані назад до інших роботів або планувальників місії. Географічні позиції від перешкод отримують за допомогою методу синтезу, який використовує як аерофотозйомку в реальному часі, так і абсолютну позицію UGV, що надається GPS[56].

Потужність системи була перевірена відповідно до вимог експерименту. Тому набір експериментів проводився як в середовищі моделювання, так і у сценарії з відкритим середовищем з реальними роботами. Наземний робот рухався навколо невідомих і захищених середовищ, не стикаючись з ними.

Після ознайомлення з проблемами роботехнічної системи було прийнято рішення оптимізувати роботу мультиагентної системи, а саме метод координованих стабільно-ефективних компромісів.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КООРДИНОВАНИХ СТАБІЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ КОМПРОМІСІВ І ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ

2.1 Концепція і визначення узагальненого управління ієрархічної системи з урахуванням отримання оптимального вигляду системи

В рамках даної роботи розглядається методика оптимізації структурно і функціонально складних АСУ в типовій формі багаторівневої ієрархічної структури з багаторівневими мультипідсистемними (багатоканальними, багатозв'язними) багатокритеріальними системами (ББС) регулювання (ББС-Р), управління (ББС-У) і прийняття рішень (ББС-ПР), представленої на рисунку 2.1.

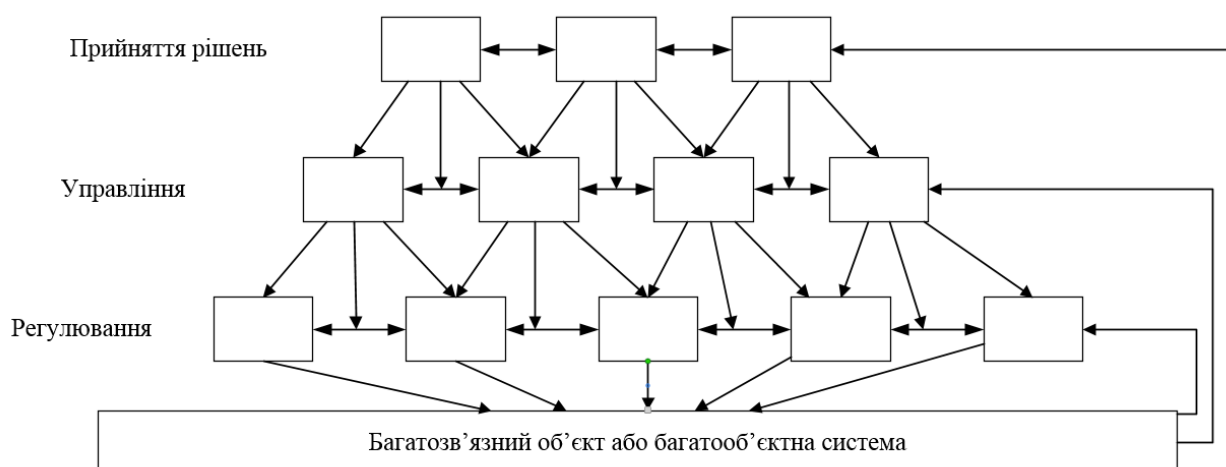


Рисунок 2.1 – Варіант функціональної структури багаторівневої системи управління

Методика оптимізації формується на основі комбінації трьох ітераційно зв'язаних етапів: етап проектування структур ієрархічних розподілених систем управління (ІРСУ) для вибору оптимальної функціональної структури ІРСУ - АСУ (вигляду АСУ); етап оптимізації ББС на рівнях регулювання, управління, прийняття рішень і так далі в структурі вигляду ІРСУ на основі стабільно-ефективних компромісів з балансуванням (врівноваженням) підсистем-каналів регулювання, управління, прийняття рішення на кожному рівні в процесі оптимізації ББС за ефективністю або втратами; етап оптимізації міжрівневої координації з пріоритетом - «правом першого ходу» кожного

верхнього рівня в ІРСУ - АСУ. Дана концепція дозволяє сформулювати визначення узагальненого оптимального управління в ІРСУ - АСУ та сформувати структуру алгоритму оптимізації управління ІРСУ, представлену на рисунку 2.2.

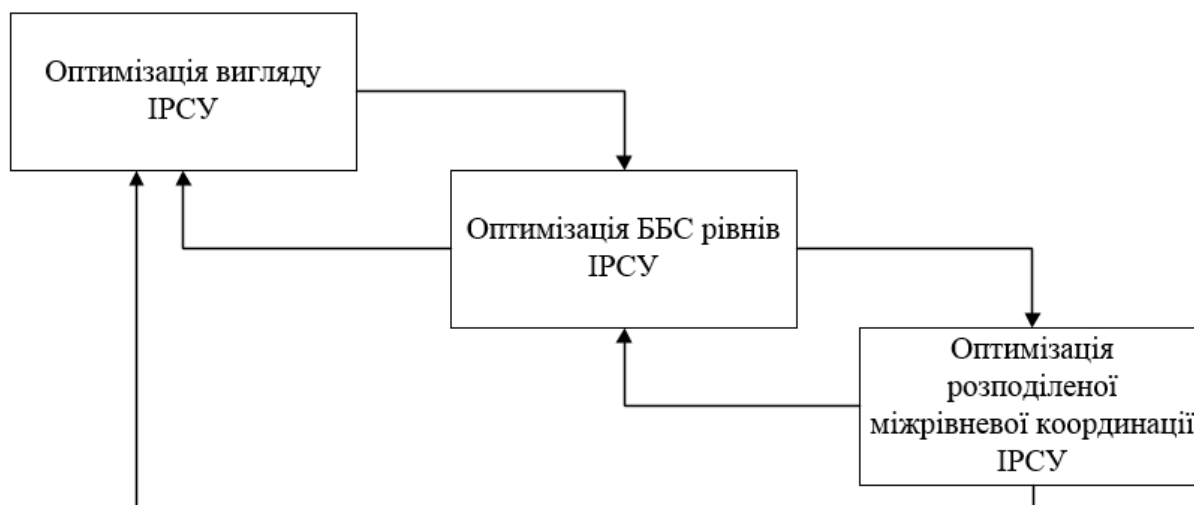


Рисунок 2.2 – Структура методу трьохетапної ітераційно-пов'язаної оптимізації ІРСУ

Узагальнене оптимальне управління багаторівневою АСУ формується на основі комбінацій процесів:

- 1) багатокритеріального вибору оптимальної функціональної структури АСУ;
- 2) рівноважно-арбітражної багатокритеріальної оптимізації ББС рівнів;
- 3) оптимізації міжрівневої координації.

Зрозуміло, що дане узагальнене управління АСУ з урахуванням багаторівневих і міжрівневих зв'язків вимагає розробки єдиної технології її оптимізації.

Оптимальний вигляд в загальному випадку вибирається на підставі послідовної процедури багатокритеріальної оптимізації вигляду ієрархічної розподіленої системи управління за схемою: оптимальна функціональна - оптимальна функціонально-організаційна - оптимальна технічна структурна представлена на рисунку 2.3.

В якості визначення в практичному прикладі дворівневої трьохканальної СУ наведення-стабілізації БПЛА – функціональний вигляд вже обраний. Далі формується

ітераційна процедура оптимізації управління на основі рівноважно-арбітражного алгоритму на ББС-рівнях і алгоритму отримання міжрівневих координацій на основі узагальненого ієрархічного рівноваження по Штакельбергу[57].

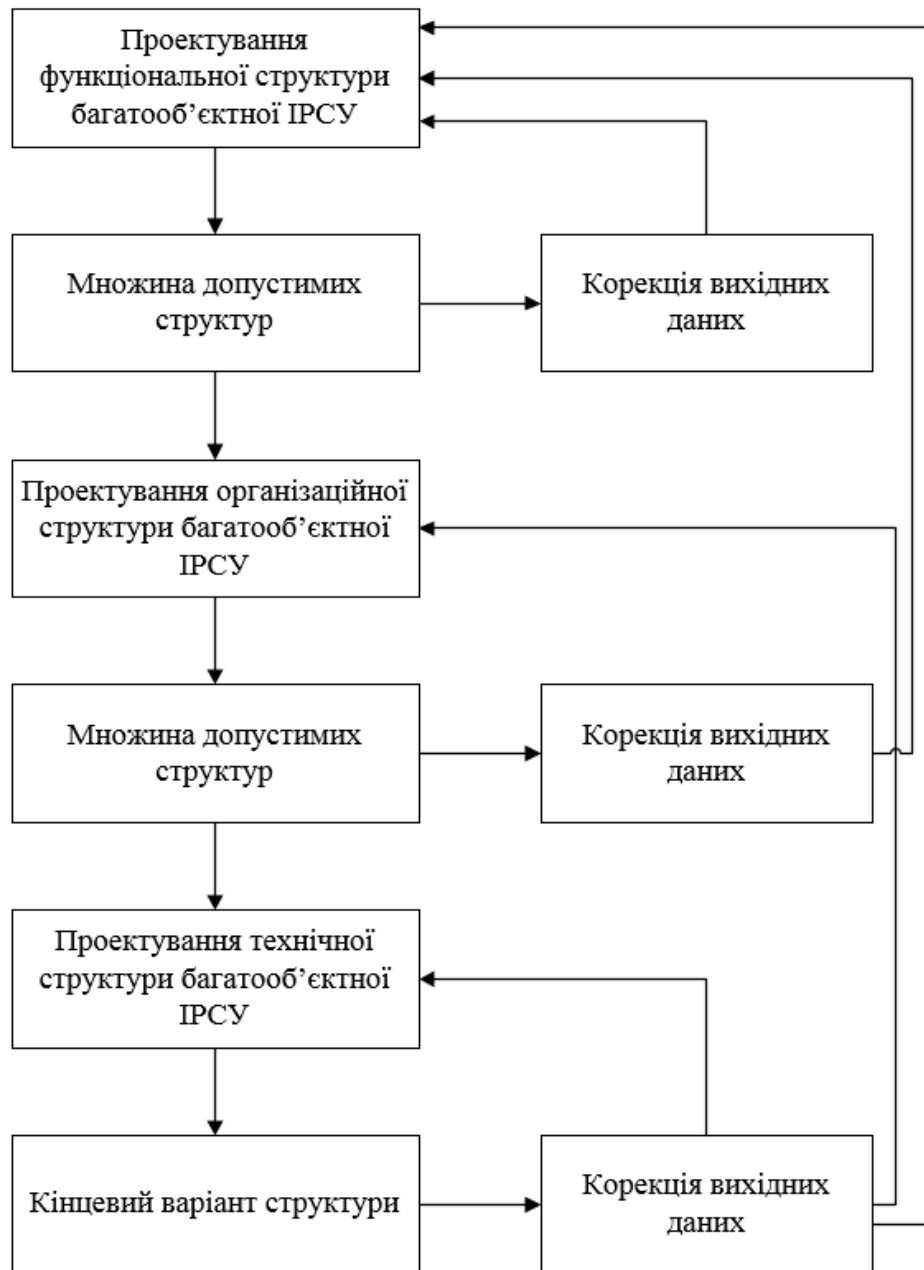


Рисунок 2.3 – Схема трьохетапної процедури багатокритеріальної оптимізації вигляду ієрархічної розподіленої системи управління

На відповідних рівнях вибираються параметри $k_{y1,2}, k_{k1,2}$, і $k_{\omega z}, k_{n_y}, k_{sny}, k_{\omega y}, k_{nz}, k_{snz}, k_{\omega x}, k_{\gamma}, k_{s\gamma}$, які забезпечують балансування і Парето-оптимальність на основі рівноважно-арбітражної схеми стабільно-ефективного компромісу. Сигнали $u_l (l = 1, 2)$ забезпечують міжрівневу координацію між рівнем управління і стабілізації, а

$\nu_i (i=1,2,3)$ забезпечують виконавче управління. На рівні стабілізації в якості керуючих сигналів $\nu_i (i=1,2,3)$ прийняті сигнали зміни кутів відхилення керма висоти, керма напрямку і елеронів.

У роботі представлений алгоритм оптимізації узагальненого управління багаторівневої АСУ на основі дослідженого методу ієрархічного врівноваження за Штакельбергом, в якому узагальнюється відоме поняття стратегії за Штакельбергом в класі ієрархічних диференціальних ігор (ІДІ)[58].

2.2 Визначення та структурні властивості ієрархічної рівноваги в багаторівневих системах управління і багаторівневих СТЕК теорії оптимального управління ББС як основи КОСТЕК

2.2.1 Методи ієрархічного врівноваження і узагальнення стратегії міжрівневого координування за Штакельбергом

У даній роботі розвиваються і застосовуються підходи класу ієрархічних диференціальних ігор (ІДІ). Без обмеження загальності міркувань розглянемо дворівневу ІДІ з «правом першого ходу» верхнього рівня. На відміну від відомих результатів і відповідно до структурних вимог багаторівневої СУ кожен верхній рівень являє собою структуровану ББС з вихідною структурною неузгодженістю, представленою на рисунку 2.4. На рисунку 2.4 відповідно до опису моделі практичного прикладу верхній рівень ІСУ є двоканальним ББС-У, який відповідно за термінологією буде позначатися ББС - Центр (ББС- Ц), а нижній рівень ієрархічної СУ є трьохканальною системою стабілізації, який відповідно до термінології матиме позначення ББС - Виконавча система (ББС-ВС).

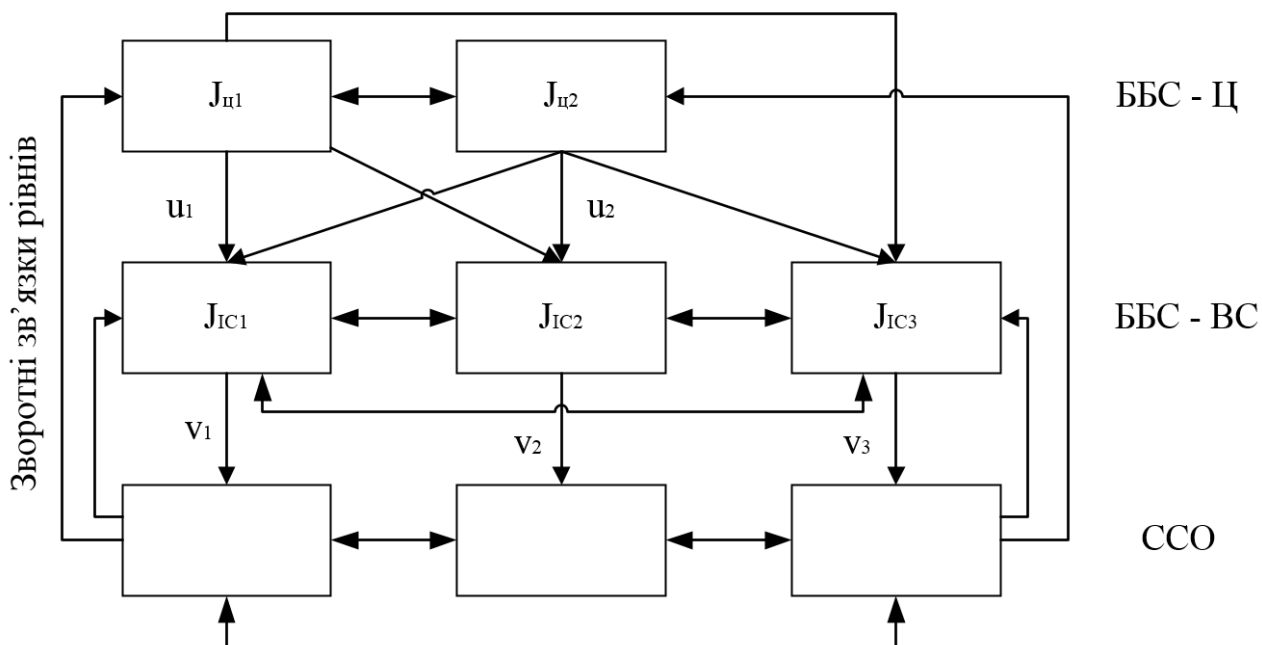


Рисунок 2.4 – Структурна схема дворівневої трьохпідсистемної ІДІ: верхній рівень: ББС-Центр; нижній рівень: ББС-Виконавча Система (ББС-ВС); структурно-складний об'єкт (ССО)

На рисунку 2.4 збережені традиційні позначення двоступеневої диференціальної гри Центру і виконавчої системи (ВС). Але відповідно до дворівневої структури управління-регулювання, верхній рівень може мати сенс ББС. Отже, в даній роботі має місце узагальнення двоступеневої ІДІ.

Структурно складний об'єкт (ССО) має математичну модель:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{u}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \dim \mathbf{x} = n, \quad (2.1)$$

де \mathbf{v} – управління з розподіленим виконанням представлено на рисунку 2.4.

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= (v_1, v_2, v_3), \dim v_i = m_i, i = 1, 2, 3, v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}, \\ \dim \mathbf{v} = m &= \sum_{i=1}^3 m_i, \mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3 \subset \mathbf{E}^m. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Управління-координація ББС – Ц:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (u_1, u_2), \dim u_i = k_i \geq 3, u_i \in \mathbf{U}_i \subset \mathbf{E}^{k_i}, \\ \dim \mathbf{u} = k &= \sum_l k_l, \mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2 \subset \mathbf{E}^k. \end{aligned} \quad (2.3)$$

При розподіленій координації \mathbf{u} , яка пов'язана з однією з підсистем ББС-ВС, остання нерівність може не виконуватись[59].

Структурно і функціонально пов'язані задачі ББС-Ц і ББС-ВС характеризуються, відповідно, показниками критеріїв ефективності:

$$J_{Цlm} = J_{Цlm}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), l = \overline{1,3}, m = \overline{1,2}; \quad (2.4)$$

$$J_{BCij} = J_{BCij}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), i = \overline{1,4}, j = \overline{1,3}. \quad (2.5)$$

Загальна структура показників (2.4),(2.5) має вигляд:

$$J_{lji} = \Phi_{lji}(\mathbf{x}, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{lji}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) dt, \quad (2.6)$$

якщо $l = \text{Ц}$: $i = \overline{1,3}, j = \overline{1,2}$; якщо $l = \text{ВС}$: $i = \overline{1,4}, j = \overline{1,3}$.

Ієрархічною рівновагою ІДІ (ІРІДІ) з правом першого ходу верхнього рівня в попарній взаємодії рівнів – називається набір взаємозв'язаних рівноважних ситуацій безлічі рівнів ІДІ при фіксованих ступенях конфліктності в рівнях ББС.

Структурні властивості ієрархічного рівноважного рішення дворівневої ІДІ з узагальненням стратегії Штакельберга становлять трьохетапну процедуру отримання узагальненого управління.

На першому етапі ББС-Центр на «правах першого ходу» повідомляє ББС- ВС свою координацію в формі закону-стратегії $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) \in \mathbf{U}$ для кожної позиції з множини $\{t, \mathbf{x}\}$ або програмно-коректуючого закону-стратегії управління (ПКЗУ) для кінцевої множини $\{t_i, \mathbf{x}(t_i), t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots < t_K = T\}$ або програмного керування $\mathbf{u}(t)$ для всіх $t \in [t_0, t_K]$, або векторно параметричної множини $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$.

На другому етапі на рівні ББС-ВС формується відображення $\mathbf{R}: \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ таке, що при кожному фіксованому $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$:

$$\max_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} \varphi_{BC}(J_{BC1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \dots, J_{BC3}(\mathbf{u}, \mathbf{v})) = \varphi_{BC}(J_{BC1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \dots, J_{BC3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})). \quad (2.7)$$

Конкретний вид функції φ_{BC} визначається як балансування ефективності підсистем ВС в умовах вихідної структурної неузгодженості на множині ступенів

конфліктності підсистем ББС-ВС (антагонізм, безкоаліційний або коаліційний конфлікт, кооперація).

На третьому етапі, який розвиває стратегію Штакельберга і узагальнює ІРІДІШ, ББС-Ц обирає рішення:

$$\max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \varphi_{\Pi}(J_{\Pi 1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \dots, J_{\Pi 3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})) = \varphi_{\Pi}(J_{\Pi 1}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}), \dots, J_{\Pi 3}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru})). \quad (2.8)$$

Конкретний вид функції φ_{Π} визначається як балансування ефективності підсистем Ц на множині ступенів конфліктності підсистем ББС-Ц.

Набір $\{\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}\}$ визначається як ієрархічна рівновага за Штакельбергом (ІРІДІШ).

Зауваження 2.1. У загальному випадку управління-координація \mathbf{u} ББС-Ц і виконавче управління \mathbf{v} ББС-ВС є узагальненими векторами $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}), \mathbf{v}(t, \mathbf{x})$ відповідно з набором показників-вимог.

Зауваження 2.2. Функції $\varphi_{\Pi}, \varphi_{BC}$ є функціями балансування на рівнях на основі урівноваження Неша.

Зауваження 2.3. Для забезпечення на ББС-рівнях балансування з подальшою Парето-оптимізацією функцій J_{BC}, J_{Π} з урахуванням арбітражної схеми Неша (АСН) функції $\varphi_{\Pi}, \varphi_{BC}$ приймають більш загальний вигляд: на другому кроці формується $\mathbf{R}_{ACH}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^{ACH}$, а на третьому вводиться додаткова операція $J_{\Pi}(\mathbf{u}^{\Pi}, \mathbf{R}_{ACH}(\mathbf{u}^{\Pi})) = \max_{\mathbf{u}} \prod_l [J_{\Pi l} - J_{\Pi l}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}_{ACH}(\mathbf{u}^r))], l = \overline{1, 2}$, де \mathbf{u}^{Π} - оптимальна за Парето[60].

Зауваження 2.4. При зазначеному узагальненні функцій $\varphi_{\Pi}, \varphi_{BC}$ (зауваження 2.3), координація рівня наведення збігається з \mathbf{u}^{Π} при умові $\mathbf{R}_{ACH}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^{ACH}$.

Зауваження 2.5. У дворівневій задачі управління-регулювання, зображеній на рисунку 2.4, при заданих зв'язках $\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\mathbf{u}}(\mathbf{k}, t)$ та $\mathbf{v} = \mathbf{F}_{\mathbf{v}}(\mathbf{k}, t)$ отримана координація формує вектор параметрів $\mathbf{k}_{\Pi} = (k_y, k_k)$, а виконавче управління описується вектором параметрів $\mathbf{k}_{BC} = (k_{\omega z}, k_{ny}, k_{sny}, k_{\omega y}, k_{nz}, k_{snz}, k_{\omega x}, k_{\gamma}, k_{sy})$.

2.2.2 Рівноважно-арбітражні алгоритми параметричних стабільно-ефективних компромісів оптимізації порівневих багатооб'єктних багатокритеріальних систем

У розглянутих прикладних задачах коаліції збігаються з вихідними структурними одиницями ББС - об'єктами (каналами ССТ і каналами системи наведення). Вихідну структурну неузгодженість в прикладній ББС (дворівневій багатоканальній системі наведення-стабілізації з перехресними зв'язками) можна описати одним з таких принципів конфліктної взаємодії: антагонізм, безкоаліційна, коаліційна і кооперативна взаємодія. З поступовим зменшенням конфліктності від антагонізму до відсутності конфліктності (кооперація).

В даних принципах конфліктної взаємодії закладені три фундаментальні поняття теорії оптимального управління ББС (ТОУ ББС): стабільність, ефективність, стабільно-ефективний компроміс (СТЕК).

Стабільність ББС – це забезпечення міжоб'єктно стійких, збалансованих по ефективності процесів функціонування та проектування багатооб'єктних структур на основі урівноваження в умовах вихідної структурної неузгодженості, конфлікту і невизначеності.

Ефективність ББС – це досягнення максимальної цільової якості об'єктів, коаліції і ББС в цілому на основі сталого і раціонального коаліціонування.

Стабільно-ефективний компроміс (СТЕК) – це об'єднання стабільності і ефективності на множині рішень – від повного збігу даних властивостей в одній точці множині значень вектору показників J (або множині керувань U) до забезпечення можливого ступеня зближення в умовах інформаційно-тактичних розширень угод.

У розглянутій прикладній задачі мають місце умови вихідної структурної неузгодженості, коли канали системи, при наявності перехресних зв'язків, необхідно безкоаліційно збалансувати за $J_i (i=1,2)$ стійкості, якості, точності і швидкодії в каналі, а потім результат спроектувати в точку Парето-границі множини значень відображення $J(Q)$, найближче до збалансованої точки урівноваження $J^r = (J_1^r, J_2^r)$, де r – індекс рівноваги.

Таким чином, пропонується взяти за основу методу оптимізації – метод отримання узагальненого компромісу на основі послідовного застосування безкоаліційних і кооперативних «взаємодій» каналів[61].

При безкоаліційній взаємодії основним принципом оптимальності (стабільності) є рівновага Неша.

Набір рішень $q^r = (q^{r,1}, \dots, q^{r,m_k})$ є рівноважним за Нешем щодо скалярного показника $\Phi_i^c = \sum_{j \in K_i} \lambda_j^i \cdot J_j^i$, який є критерієм ефективності коаліції K_i , якщо для будь-якого $q^i \in Q_i, i \in M_k = (1, 2, \dots, m_k)$.

$\Phi_i^c(q^r \parallel q^i) \leq \Phi_i^c(q^r)$, де $(q^r \parallel q^i) = \{q^{r,1}, \dots, q^{r,i-1}, q^{r,i}, q^{r,i+1}, \dots, q^{r,m_k}\}$. Тут M_k - множина коаліцій. У прикладній задачі кожна «коаліція» складається з одного каналу і $m_k = 2$.

Для двоканальної системи визначення рівноваги перетворюється в наступну систему нерівностей при $q^i = Q_i$:

$$\begin{cases} J^1(q^1, q^{r2}) \leq J^1(q^{r1}, q^{r2}); \\ J^2(q^{r1}, q^2) \leq J^2(q^{r1}, q^{r2}). \end{cases} \quad (2.9)$$

Простий практичний сенс активної міжканальної стійкості має той канал, в якому втрачається ефективність при відхиленні параметрів від рівноваги.

Найпростішою необхідною умовою (2.9) є система рівностей при $q^i = Q_i$.

$$\begin{cases} \frac{\partial J^1(q^1, q^{r2})}{\partial q_1} = 0; \\ \frac{\partial J^2(q^{r1}, q^2)}{\partial q_2} = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Нехай множина коаліцій $M_k = \{1\}, K = K_{ББС}$, $J^r = (J^1, \dots, J^m)$ - вектор ефективності ББС, де J^i - скалярні показники ББС. Вектор $q^0 \in Q$ оптимальний за Парето, якщо з умови $q \in Q, J(q) \geq J(q^0)$, випливає або рівність $J(q) = J(q^0)$, або система нерівностей несутимісна і хоча б одна з нерівностей – протилежного змісту.

Для двоканальної системи в умовах загального «кооперативного» аналізу двоканальної ББС множина Парето-оптимальних рішень становить об'єднання рішень семи систем нерівностей при $q^i = Q_i$, де одно чи кілька нерівностей змінюють знак.

Наприклад:

$$\begin{cases} J^1(q^1, q^2) \leq J^1(q^{01}, q^{02}) \\ J^2(q^1, q^2) \leq J^2(q^{01}, q^{02}) \end{cases} \cdots \begin{cases} J^1(q^1, q^2) \geq J^1(q^{01}, q^{02}) \\ J^2(q^1, q^2) \geq J^2(q^{01}, q^{02}) \end{cases} \cdots \quad (2.11)$$

Для пояснення геометричного сенсу Парето-області розглянемо, без обмеження спільності аналізу, двохоб'єктну ББС при кооперативній взаємодії об'єктів. Тоді $J = (J^1(q), J^2(q))$, де $q = (q^1, q^2)$, $q \in Q$. На рисунку 2.3 представлені два варіанти області Парето на області значень показників, як відображення $J(Q)$ області Q через диференціальний оператор системи і функціонал J .

Очевидна неєдність багатокритеріальних-оптимальних рішень, що є наслідком того, що дані рішення задовольняють систему нерівностей. Найпростішою необхідною умовою оптимальності за Парето є наступна система рівностей для $q \in Q$:

$$\begin{cases} \frac{\partial J^1(q)}{\partial q} = 0; \\ \frac{\partial J^2(q)}{\partial q} = 0. \end{cases} \quad (2.12)$$

На рисунку 2.5 наведено варіант реалізації компромісу (точки арбітражного рішення) яка формується на основі отриманої рівноваги Неша і може бути отримана як результат рішення задачі оптимізації, наприклад, для вектора втрат ББС на основі арбітражної схеми Неша[62].

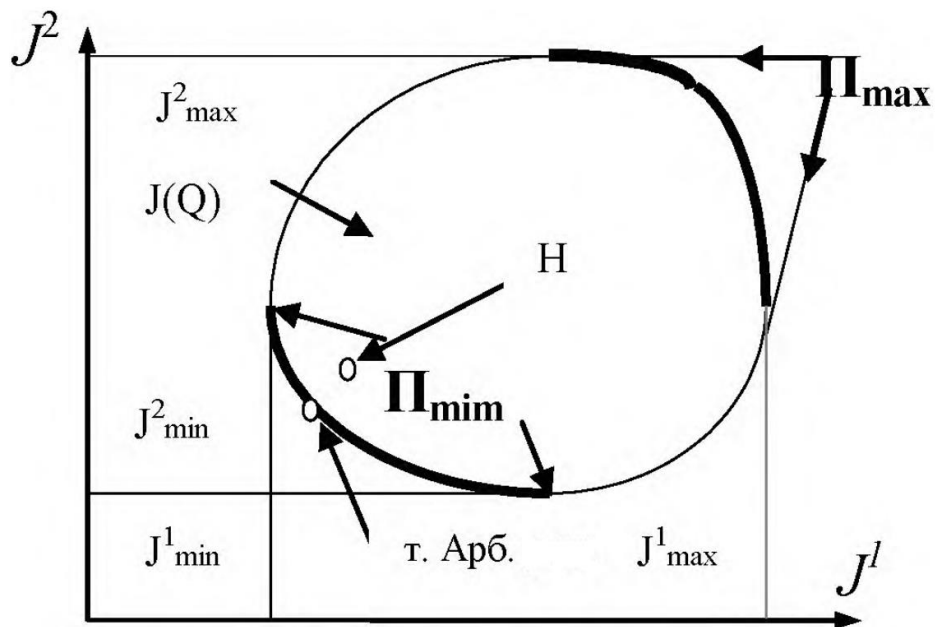


Рисунок 2.5 – Геометричне трактування області Парето:

H – точка рівноваги за Нешем, P_{\max}, P_{\min} – Парето області максимізації і мінімізації;

т.АРБ – арбітражне рішення за Нешем

Відповідно до рисунку 2.5 арбітражна схема Неша має такий вигляд при $q \in Q$:

$$\Phi_A = [J^1(q) - J^{r1}(q^r)][J^2(q) - J^{r2}(q^r)] \rightarrow \max_q \quad (2.13)$$

при умовах

$$J^1(q) \leq J^{r1}(q^r); J^2(q) \leq J^{r2}(q^r).$$

Ця схема дає результат в точці області Парето, найбільш близькою до точки балансування ББС. У цьому полягає сенс узагальненого СТЕК застосовуваного в задачі оптимізації двоканальної системи. Проведений аналіз методів оптимізації ББС дозволяє сформулювати наступну трьохетапну алгоритмічну структуру узагальненого СТЕК в задачі оптимізації багатоканальної системи наведення-стабілізації з перехресними зв'язками із забезпеченням балансування і граничної ефективності на кожному з рівнів ієрархії відповідно до другого (2.7) і третього (2.8) етапів знаходження ІРІДШ:

Етап 1. Отримання параметрів системи в кожному каналі систем наведення і стабілізації.

Етап 2. Знаходження балансування параметричного рішення на основі рівноваги за Нешем на рівні стабілізації (2.14) і на рівні наведення (2.15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial J_{BC}^1(k_{CT}^1, k_{CT}^{r2}, k_{CT}^{r3})}{\partial k_{CT}^1} = 0; \\ \frac{\partial J_{BC}^2(k_{CT}^{r1}, k_{CT}^2, k_{CT}^{r3})}{\partial k_{CT}^2} = 0; \\ \frac{\partial J_{BC}^3(k_{CT}^{r1}, k_{CT}^{r2}, k_{CT}^3)}{\partial k_{CT}^3} = 0. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial J_{\Pi}^1(k_H^1, k_H^{r2})}{\partial k_H^1} = 0; \\ \frac{\partial J_{\Pi}^2(k_H^{r1}, k_H^2)}{\partial k_H^2} = 0. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

де $k_H^1 = (k_{y1}, k_{k1}), k_H^2 = (k_{y2}, k_{k2}), k_{CT}^1 = (k_{\omega z}, k_{ny}, k_{sny}), k_{CT}^2 = (k_{\omega y}, k_{nz}, k_{snz}),$
 $k_{CT}^3 = (k_{\omega x}, k_{\gamma}, k_{s\gamma}).$

Етап 3. Парето-оптимізація параметричного рішення на основі арбітражної схеми Неша на рівні стабілізації[63] (2.16) та на рівні наведення (2.18):

$$\Phi_{BC}^A = \prod_i^3 [J^{ri}(k_{CT}^r) - J^i(k_{CT})] \rightarrow \max_{k_{CT}} \quad (2.16)$$

при умовах:

$$J_{BC}^i(k_{CT}) \leq J_{BC}^{ri}(k_{CT}^r); i = \overline{1,3} \quad (2.17)$$

$$\Phi_{\Pi}^A = [J_{\Pi}^{r1}(k_H^r) - J_{\Pi}^1(k_H)] [J_{\Pi}^{r2}(k_H^r) - J_{\Pi}^2(k_H)] \rightarrow \max_{k_H} \quad (2.18)$$

при умовах:

$$J_{\Pi}^1(k_H) \leq J_{\Pi}^{r1}(k_H^r); J_H^2(k_H) \leq J_{\Pi}^{r2}(k_H^r). \quad (2.19)$$

2.2.3 Методика формування оптимальної ієрархічної системи управління в формі алгоритму КОСТЕК на основі ІРІДІШ і РАО забезпечення балансування, і граничної ефективності ББС рівнів

Вводиться в розгляд відображення, що має сенс врівноваження за Нешем:

$$\mathbf{Ru} \parallel v_i = \begin{cases} v_1, R_2 \mathbf{u}, R_3 \mathbf{u}, i = 1; \\ R_1 \mathbf{u}, v_2, R_3 \mathbf{u}, i = 2; \\ R_1 \mathbf{u}, R_2 \mathbf{u}, v_3, i = 3. \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{Ru} = (R_1 \mathbf{u}, R_2 \mathbf{u}, R_3 \mathbf{u}), \mathbf{u} = (u_1, u_2). \quad (2.21)$$

Згідно з другим етапом отримання ІРІДІШ (2.7) за умови, що φ_{BC} реалізує операцію безкоаліційної конфліктної ситуації, на рівні ББС-ВС в підсистемах формуються три відображення $R_i : \mathbf{U} \rightarrow v_i, i = 1, 2, 3$, такі що[64]:

$$J_{BC}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}) = \max_{v_i \in V_i} J_{BCi}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru} \parallel v_i), i = 1, 2, 3. \quad (2.22)$$

У цьому випадку рівняння 2.21 реалізує рівноважне рішення з індексом r при фіксованій допустимій координації \mathbf{u} :

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{v}^r = (v_1^r = R_1 \mathbf{u}, v_2^r = R_2 \mathbf{u}, v_3^r = R_3 \mathbf{u}). \quad (2.23)$$

Процес рішення задачі (2.22) формується на основі необхідної умови рівноваги (2.24), що забезпечується алгоритмом оптимізації Пао-Неша, генетичними алгоритмами або задачею вибору на основі визначення рівноваги (2.25) в задачі мінімізації при параметризації виконавчих управлінь.

$$\begin{cases} \frac{\partial J_{BC1}(v_1, v_2^r, v_3^r)}{\partial v_1} = 0; \\ \frac{\partial J_{BC2}(v_1^r, v_2, v_3^r)}{\partial v_2} = 0; \\ \frac{\partial J_{BC3}(v_1^r, v_2^r, v_3)}{\partial v_3} = 0. \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} J_{BC1}(v_1, v_2^r, v_3^r) \geq J_{BC1}(v_1^r, v_2^r, v_3^r); \\ J_{BC2}(v_1^r, v_2, v_3^r) \geq J_{BC2}(v_1^r, v_2^r, v_3^r); \\ J_{BC3}(v_1^r, v_2^r, v_3) \geq J_{BC3}(v_1^r, v_2^r, v_3^r). \end{cases} \quad (2.25)$$

Далі відповідно до третього етапу (2.8) формується φ_{II} :

$$J_{II1}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \| u_l, \mathbf{R}(\mathbf{u} \| u_l)) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \| u_l, \mathbf{v}^r(\mathbf{u} \| u_l)), l = \overline{1, 2}, \quad (2.26)$$

де

$$\mathbf{u}^r = (u_1^r, u_2^r); \quad (2.27)$$

$$\mathbf{u} \| u_l = \begin{cases} u_1, u_2^r, l=1; \\ u_1^r, u_2, l=2. \end{cases} \quad (2.28)$$

На основі (2.28) формується урівноваження Неша на верхньому рівні. Процес рішення задачі (2.26) формується на основі необхідної умови рівноваги (2.29), що забезпечується алгоритмом оптимізації Пао-Неша[65], генетичними алгоритмами або завданням вибору на основі визначення рівноваги (2.30) в задачі мінімізації при параметризації координуючих управлінь верхнього рівня.

$$\begin{cases} \frac{\partial J_{II1}(u_1, u_2^r)}{\partial u_1} = 0; \\ \frac{\partial J_{II2}(u_1^r, u_2)}{\partial u_2} = 0. \end{cases} \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} J_{II1}(u_1, u_2^r) \geq J_{II1}(u_1^r, u_2^r); \\ J_{II2}(u_1^r, u_2) \geq J_{II2}(u_1^r, u_2^r). \end{cases} \quad (2.30)$$

Зауваження 2.6. У дворівневій задачі управління-регулювання (рисунок 2.4) при заданому зв'язку $\mathbf{u} = \mathbf{F}(\mathbf{k}, t)$ отримана координація формує вектор $\mathbf{k} = (k_{yl}, k_{kl}, l = 1, 2)$.

Далі розглядаються достатні умови узагальненого управління і два алгоритми ієрархічної оптимізації дворівневої системи: алгоритм вирішення задачі синтезу узагальненого управління в лінійно-квадратичній постановці, і загальні структурні властивості ітераційного алгоритму для постановки загального вигляду[66].

Достатні умови узагальненого управління при обраній функціональній структурі системи на основі ІРІДІШ (узагальнення достатніх умов Жуковського- Сталфорда- Вайсборда оптимального управління при обмеженнях на керування і стан).

Функція $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v})$ в (2.1) визначена на $\mathbf{E}^n \times \mathbf{E}^m \times \mathbf{E}^k$ зі значеннями в \mathbf{E}^n . У загальному випадку визначена множина можливих станів системи $\mathbf{X} \subset \mathbf{E}^n$, тобто задано обмеження типу $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$. Допустимі стратегії $\mathbf{v}(t, \mathbf{x}), \mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ задовольняють наступним умовам:

- 1) Для будь-якого набору $\mathbf{v}(t, \mathbf{x}), \mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ існує єдине абсолютно безперервне рішення $\mathbf{x}(t)$ системи (2.1).
- 2) $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i(t, \mathbf{x}), \mathbf{u}_l = \mathbf{u}_l(t, \mathbf{x}), i, l = \overline{1,3}$ належать безлічі вимірюваних за Борелем функцій (кусково-безперервні функції з кінцевим числом точок розриву першого роду) зі значеннями в \mathbf{E}^{m_i} і \mathbf{E}^{k_l} відповідно.
- 3) $\mathbf{v}_i \in \mathbf{V}_i, \mathbf{u}_l \in \mathbf{U}_l$ для всіх $t \in [t_0, t_K], i, l = 1, 2, 3$ і $\mathbf{V}_i(t, \mathbf{x}), \mathbf{U}_l(t, \mathbf{x})$ – багатозначні функції, які кожному моменту часу $t \in [t_0, t_K]$ і будь-якому $\mathbf{x} \in \overline{\mathbf{X}}$ ставить у відповідність деяку підмножину просторів \mathbf{E}^{m_i} і \mathbf{E}^{k_l} відповідно.

$$\mathbf{H}_{iu}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, v_1, v_2, v_3) = \frac{\partial W_{jiu}(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \left(\frac{\partial W_{jiu}(t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, v_1, v_2, v_3) + \quad (2.31)$$

$$+ f_{BCi}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, v_1, v_2, v_3), i = \overline{1,3}$$

при

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}_{ju}, j \in \mathfrak{I}_u, t \in [t_0, t_K].$$

Індекс \mathbf{u} в локально Ліпшицевих (і диференціююмих) функціях $W_{jiu} = \mathbf{V}_i(t, \mathbf{x})$ на підмножині розбиття \mathbf{X}_{ju} :

$$\mathbf{D}_u = \left\{ \mathbf{X}_{ju} (j \in \mathfrak{I}_u), \mathbf{X}_{ju} \cap_{j \neq k} \mathbf{X}_{ku} = \emptyset, \cup \mathbf{X}_{ju} = \mathbf{X} \right\}$$

При наявності обмежень $\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbf{E}^n$ і на всьому \mathbf{E}^n при відсутності обмежень на стан означає фіксовану стратегію ББС верхнього рівня.

$$\mathbf{H}_{lv}(t, \mathbf{x}, u_1, u_2, \mathbf{v}) = \frac{\partial W_{jlv}(t, \mathbf{x})}{\partial t} + \left(\frac{\partial W_{jlv}(t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^T f(t, \mathbf{x}, u_1, u_2, \mathbf{v}) + \quad (2.32)$$

$$+ f_{lv}(t, \mathbf{x}, u_1, u_2, \mathbf{v}), l = \overline{1,2}$$

при

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X}_{j\mathbf{v}}, j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{v}}, t \in [t_0, t_K].$$

Індекс \mathbf{v} в функціях $W_{j\mathbf{v}} = \mathbf{V}_l(t, \mathbf{x})$ на підмножині розбиття $\mathbf{X}_{j\mathbf{v}}$:

$$\mathbf{D}_{\mathbf{v}} = \left\{ \mathbf{X}_{j\mathbf{v}} (j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{v}}), \mathbf{X}_{j\mathbf{v}} \cap \mathbf{X}_{k\mathbf{v}} = \emptyset, \cup \mathbf{X}_{j\mathbf{v}} = \mathbf{X} \right\}$$

означає фіксовану стратегію ББС нижнього рівня.

Тут $\mathfrak{I}_{\mathbf{u}}$ та $\mathfrak{I}_{\mathbf{v}}$ – лічильні множини індексів, відповідних розбиттів $\mathbf{D}_{\mathbf{u}}$ та $\mathbf{D}_{\mathbf{v}}$ множини \mathbf{X} .

Твердження. Якщо існують

1) для кожного фіксованого $\mathbf{u} \in U$ розбиття множини \mathbf{X} , функції $\mathbf{V}_{i\mathbf{u}}(t, \mathbf{x})$, $i = \overline{1, 3}$

класу C^1 по $\mathbf{D}_{\mathbf{u}}$ і однозначні функції $v_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{u})$, $i = \overline{1, 3}$ такі, що

$$\begin{aligned} v_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}(t, \mathbf{x})) &= R_i(\mathbf{u}) \in \mathbf{V}_i, \\ \mathbf{H}_{i\mathbf{u}}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u})) &= \max_{v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}} \mathbf{H}_{i\mathbf{u}}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \parallel v_i), \end{aligned}$$

$$\mathbf{H}_{i\mathbf{u}}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}(t, \mathbf{x}), \mathbf{R}(\mathbf{u})) = 0, i = \overline{1, 3}$$

для всіх $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_{j\mathbf{u}}, j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{u}}, t \in [t_0, t_K]$.

2) розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{v}}$ множини \mathbf{X} , функції $\mathbf{V}_{l\mathbf{v}}(t, \mathbf{x})$, $l = \overline{1, 2}$ класу C^1 по $\mathbf{D}_{\mathbf{v}}$ і стратегія

Центру $\mathbf{u} \in U$ такі, що

$$\mathbf{H}_{l\mathbf{v}}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) = \max_{u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{m_l}} \mathbf{H}_{l\mathbf{v}}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}^r \parallel u_l, \mathbf{R}(\mathbf{u}^r \parallel u_l)) = 0, l = \overline{1, 2}$$

при $\mathbf{x} \in \mathbf{X}_{j\mathbf{v}}, j \in \mathfrak{I}_{\mathbf{v}}, t \in [t_0, t_K]$, тоді набір $\{\mathbf{u}^r, R_1\mathbf{u}, R_2\mathbf{u}, R_3\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}\}$ є ієрархічним рівноважним рішенням (ІРІДІШ) в дворівневій системі управління[67], при цьому

$$\mathbf{V}_{i\mathbf{u}}(t_K, \mathbf{x}) = \Phi_{BCi}(t_K, \mathbf{x}); \mathbf{u} \in U, i = \overline{1, 3},$$

$$\mathbf{V}_{l\mathbf{v}}(t_K, \mathbf{x}) = \Phi_{l\mathbf{v}}(t_K, \mathbf{x}); \mathbf{v} = \mathbf{R}\mathbf{u}, l = \overline{1, 2},$$

а виграші ББС верхнього і нижнього рівнів відповідно рівні:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{l\mathbf{v}}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) &= \mathbf{V}_{\mathbf{v}}(t_0, \mathbf{x}_0) = (\mathbf{V}_{1\mathbf{v}}(t_0, \mathbf{x}_0), \mathbf{V}_{2\mathbf{v}}(t_0, \mathbf{x}_0)), \\ \mathbf{J}_{BC}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) &= \mathbf{V}_{\mathbf{u}}(t_0, \mathbf{x}_0) = (\mathbf{V}_{1\mathbf{u}}(t_0, \mathbf{x}_0), \mathbf{V}_{2\mathbf{u}}(t_0, \mathbf{x}_0), \mathbf{V}_{3\mathbf{u}}(t_0, \mathbf{x}_0)). \end{aligned}$$

Узагальненням функцій φ_{BC} та φ_{Π} , що підвищує ефективність узагальненого ІРІДІШ, є запропонована рівноважно-арбітражна алгоритмічна структура оптимізації, яка формує стабільно-ефективний компроміс[68]. Так для формування φ_{BC} на ітерації другого етапу РАА-ІРІДІШ визначається $\mathbf{v}^r = \mathbf{R}\mathbf{u}$, як рівноважно-арбітражне рішення при фіксованому \mathbf{u} , а потім відповідно до арбітражної схеми Неша визначається $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{AC}(\mathbf{u})$. При цьому \mathbf{v}_{AC} знаходиться на Парето-множині ітераційного фронту Парето \mathbf{J}_{BC} .

$$J_{BC}^{AC} = \prod_i (J_{BCi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - J_{BCi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r)) \rightarrow \max_{\mathbf{v}}$$

Може бути показано, що $J_{BC}^{AC}(\mathbf{u}, \mathbf{v}_{AC})$ на ітерації РАА-ІРІДІШ дає граничний по ефективності результат в точці фронту Парето близькому до $J_{BC}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r)$.

Аналогічний результат формування φ_{Π} має місце на ітерації третього етапу РАА-ІРІДІШ[69].

Таким чином, алгоритм РАА-ІРІДІШ дає подвійне узагальнення відомого алгоритму ІРІДІШ з централізованим верхнім рівнем (Центром).

2.3 Варіанти вирішення задачі оптимального управління ієрархічною системою

У загальному випадку нелінійного опису задачу отримання законів $\mathbf{u}(\mathbf{x}), \mathbf{v}(\mathbf{x})$ аналітично вирішувати неможливо. Наближене рішення рівняння Гамільтона - Келлі є також трудомістким процесом, пов'язаним з різними обчислювальними складнощами: рівняння Гамільтона-Келлі виводиться для функції ціни в припущенні, що вона є гладкою, насправді вона такою не є, і без додаткових умов неможливо її однозначно визначити, що призводить до узагальненого рішення рівняння Гамільтона-Келлі. В цьому випадку важко визначити узагальнене рішення, яке було б коректне (тобто існувало, було єдиним і безперервно залежало б від початкових даних), яке б узгоджувалося з класичним поняттям рішення (узагальнене рішення повинно задовольняти рівняння всюди, де воно диференційовано, а також має відповідати всім

вимогам, що визначає узагальнене рішення), і яке б відповідало змістовному змісту цих рівнянь.

У зв'язку з цим в роботі можливі наступні варіанти вирішення задачі оптимального управління ієрархічною системою:

1. Розв'язання задачі синтезу оптимального закону керування ІРС в лінійно-квадратичній постановці для нелінійної моделі керування;
2. При заданому технічному вигляді системи в практичних задачах сформулювати функціональні залежності управління на обох рівнях ієрархії, як функції параметрів на кожному з рівнів $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t)$ та $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t)$. Як наслідок, будуть сформовані і вирішені параметризовані задачі на основі узагальненої стратегії Штакельберга або їх рівноважно-арбітражного узагальнення на РАА-ІРІДІШ без вирішення рівнянь Гамільтона-Келлі.

2.4 Рішення лінійно-квадратичної задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи на основі КОСТЕК в нелінійній моделі керування

В рамках реалізації першого варіанта наводиться алгоритм вирішення задачі аналітичного синтезу оптимального закону узагальненого управління дворівневої системи в лінійно-квадратичній постановці, який без обмеження суті результату представлений в формі отримання ІРІДІШ.

Для цього необхідно привести опис моделі до наступного вигляду:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}_{I1}(t)u_1 + \mathbf{B}_{I2}(t)u_2 + \mathbf{B}_{BC1}(t)v_1 + \mathbf{B}_{BC2}(t)v_2 + \mathbf{B}_{BC3}(t)v_3, \quad (2.33)$$

де \mathbf{u} – управління-координація ББС-Ц:

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2, u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{m_l}, l = \overline{1,2};$$

\mathbf{v} – виконавче управління ББС-ВС:

$$\mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3, v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}, i = \overline{1,3};$$

\mathbf{x} – вектор стану ССО, $\mathbf{x} \in \mathbf{E}^n$.

Критерії ефективності підсистем ББС-Ц, зв'язаних через ССО (2.34) мають вигляд:

$$J_{Цl}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k) \mathbf{C}_l \mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q}_l(t) \mathbf{x} + u_l^T \mathbf{D}_l(t) u_l] dt, l=1,2. \quad (2.34)$$

Критерії ефективності підсистем ББС-ВС, зв'язаних через ССО (2.35) з координатами ББС-Ц:

$$J_{BCi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k) \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q}_i(t) \mathbf{x} + 2\mathbf{u}^T \mathbf{P}_i(t) v_i + v_i^T \mathbf{D}_i(t) u_i] dt, i=1,2,3, \quad (2.35)$$

де $\mathbf{u}^T \mathbf{P}_i(t) = [u_1^T \mathbf{P}_{i1}(t) + u_2^T \mathbf{P}_{i2}(t)]$ – вплив координації в показниках.

Тут $t_0, t_k = \text{const} > 0$; елементи всіх матриць неперервні при $t \in [t_0, t_k]$; матриці $\mathbf{C}_l, \mathbf{C}_i, l = \overline{1,2}, i = \overline{1,3}$ постійні; матриці $\mathbf{C}_l, \mathbf{C}_i, \mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_i, \mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i, l = \overline{1,2}, i = \overline{1,3}$ симетричні, а матриці $\mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i, l = \overline{1,2}, i = \overline{1,3}$ визначено негативні, тому зворотні матриці є невивірженими.

Допустимі структури керувань u_l, v_i підсистем ББС-Ц і ББС-ВС обмежені функціями виду:

$$u_l(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{u_l}(t) \cdot \mathbf{x}, v_i(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{v_i}(t) \cdot \mathbf{x}, l=1,2, i = \overline{1,3},$$

де матриці $\mathbf{K}_l, \mathbf{K}_i$ неперервні.

З опису системи (2.33), а також критеріїв ефективності на кожному рівні ієрархії (2.34), (2.35) можна сформулювати систему матричних рівнянь (2.36), рішення якої дозволяє отримати вид оптимальних керуючих впливів на рівні верхньому і нижньому рівнях ієрархії (2.37).

$$\begin{aligned}
& \Theta_{iu} + 2\Theta_{iu}(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1 \mathbf{K}_{u1} - \mathbf{M}_2 \mathbf{K}_{u2} - \bar{\mathbf{B}}_j \Theta_{ju}) + \mathbf{Q}_i - \\
& - \left(\mathbf{K}_{u1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i1} \mathbf{K}_{u1} + \mathbf{K}_{u2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i2} \mathbf{K}_{u2} + \mathbf{K}_{u1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i12} \mathbf{K}_{u2} + \mathbf{K}_{u2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i1}^T \mathbf{K}_{u1} \right) - \\
& - \left(\mathbf{K}_{u1}^T \mathbf{L}_{i1} \Theta_{iu} + \mathbf{K}_{u2}^T \mathbf{L}_{i2} \Theta_{iu} + \Theta_{iu} \mathbf{L}_{i1}^T \mathbf{K}_{u1} + \Theta_{iu} \mathbf{L}_{i2}^T \mathbf{K}_{u2} \right) - \\
& \Theta_{iu} \bar{\mathbf{B}}_i \Theta_{iu} = 0, \Theta_{iu}(t_k) = \mathbf{C}_i, i, j = \overline{1,3}, i \neq j,
\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_l &= \mathbf{B}_{BC1} \mathbf{D}_{BC1}^{-1} \mathbf{P}_{1l}^T + \mathbf{B}_{BC2} \mathbf{D}_{BC2}^{-1} \mathbf{P}_{2l}^T + \mathbf{B}_{BC3} \mathbf{D}_{BC3}^{-1} \mathbf{P}_{3l}^T - \mathbf{B}_{ll}, l = 1, 2; \\
\bar{\mathbf{B}}_i &= \mathbf{B}_{BCi} \mathbf{D}_{BCi}^{-1} \mathbf{B}_{BCi}^T, \bar{\mathbf{B}}_i^T = \bar{\mathbf{B}}_i, i = \overline{1,3}; \\
\bar{\mathbf{P}}_{ij} &= \mathbf{P}_{ij} \mathbf{D}_{BCi}^{-1} \mathbf{P}_{ij}^T, i, j = \overline{1,3}; \\
\bar{\mathbf{P}}_{i12} &= \mathbf{P}_{i1} \mathbf{D}_{BCi}^{-1} \mathbf{P}_{i2}^T, \bar{\mathbf{P}}_{i21} = \bar{\mathbf{P}}_{i12}^T, i = \overline{1,3}; \\
\mathbf{L}_{ij} &= \mathbf{P}_{ij} \mathbf{D}_{BCi}^{-1} \mathbf{B}_i^T, \mathbf{L}_{ji} = \mathbf{L}_{ij}^T, i, j = \overline{1,3},
\end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
& \bullet \quad \dot{\mathbf{K}}_{iu_l} + \mathbf{K}_{iu_l}^T \left[\mathbf{A} - \mathbf{M}_l \mathbf{K}_{u_l} - \mathbf{M}_p \mathbf{K}_{u_p} - \bar{\mathbf{B}}_1 \Theta_{1u} - \bar{\mathbf{B}}_2 \Theta_{2u} \right] - \\
& - \mathbf{K}_{ju_l}^T \bar{\mathbf{B}}_j \Theta_{iu} - 2\mathbf{M}_l^T \Theta_{iu} - 2\bar{\mathbf{P}}_{il} \mathbf{K}_{u_l} - 2\bar{\mathbf{P}}_{ilp} \mathbf{K}_{u_p} = 0, \\
& \mathbf{K}_{iu_l}(t_k) = 0, i, j = 1, 2, i \neq j, l, p = 1, 2, l \neq p; \\
& \bullet \quad \dot{\Theta}_l + 2\Theta_l \left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1 \hat{\mathbf{K}}_1 \Theta_1 - \mathbf{M}_2 \hat{\mathbf{K}}_2 \Theta_2 - \bar{\mathbf{B}}_1 \Theta_{1u^r} - \bar{\mathbf{B}}_2 \Theta_{2u^r} \right) - \\
& - \Theta_l \hat{\mathbf{K}}_l^T \mathbf{D}_l \hat{\mathbf{K}}_l \Theta_l = 0, \Theta_l(t_k) = \mathbf{C}_l, l = 1, 2; \\
& \bullet \quad \dot{\Theta}_i + 2\Theta_i(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1 \mathbf{K}_{u1} - \mathbf{M}_2 \mathbf{K}_{u2} - \bar{\mathbf{B}}_j \Theta_j) + \mathbf{Q}_i - \\
& - \left(\mathbf{K}_{u1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i1} \mathbf{K}_{u1} + \mathbf{K}_{u2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i2} \mathbf{K}_{u2} + \mathbf{K}_{u1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i12} \mathbf{K}_{u2} + \mathbf{K}_{u2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i12}^T \mathbf{K}_{u1} \right) - \\
& - \left(\mathbf{K}_{u1}^T \mathbf{L}_{i1} \Theta_i + \mathbf{K}_{u2}^T \mathbf{L}_{i2} \Theta_i + \Theta_i \mathbf{L}_{i1}^T \mathbf{K}_{u1} + \Theta_i \mathbf{L}_{i2}^T \mathbf{K}_{u2} \right) - \Theta_i \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{Q}_i = 0, \\
& \Theta_i(t_k) = \mathbf{C}_i, i, j = \overline{1,3}, i \neq j,
\end{aligned} \right. \quad (2.36)$$

де

$$\begin{aligned}
\Theta_i &= \Theta_{iu^r}, i=1,2; \\
\mathbf{K}_{u_l} &= \hat{\mathbf{K}}_l \Theta_l, l=1,2; \\
\hat{\mathbf{K}}_l &= \mathbf{D}_l^{-1} \left(\mathbf{M}_l^T + \frac{1}{2} \mathbf{K}_{lu_l}^T \bar{\mathbf{B}}_1 + \frac{1}{2} \mathbf{K}_{2u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_2 \right); \\
u_l^r(t, \mathbf{x}) &= \mathbf{D}_l^{-1} \left(\mathbf{M}_l^T + \frac{1}{2} \mathbf{K}_{lu_l}^T \bar{\mathbf{B}}_1 + \frac{1}{2} \mathbf{K}_{2u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_2 + \frac{1}{2} \mathbf{K}_{3u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_3 \right) \Theta_l \mathbf{x}, l=1,2.
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Ці рішення спільно з рівноважними рішеннями ББС-ВС:

$$\mathbf{v}^r(t, \mathbf{x}) = \mathbf{R}\mathbf{u} = (R_1\mathbf{u}, R_2\mathbf{u}, R_3\mathbf{u}) = (v_1^r, v_2^r, v_3^r), \tag{2.38}$$

де

$$v_i^r(t, \mathbf{x}) = R_i(\mathbf{u}) = -\mathbf{D}_{BCi}^{-1} \left[\mathbf{P}_i^T \mathbf{u}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{B}_{BCi}^T \Theta_{iu} \mathbf{x} \right], i = \overline{1,3}; \tag{2.39}$$

$$\Theta_{iu} = \Theta_{iu^r} = \Theta_i; \mathbf{u}(t, \mathbf{x}) = \mathbf{u}^r(t, \mathbf{x}) \tag{2.40}$$

Визначають ІРІДІШ в дворівневій системі з ББС-Ц і ББС-ВС в рамках лінійно-квадратичної постановки.

При цьому оптимальні рівноважні показники ББС-Ц і ББС-ВС можна визначити з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned}
J_{Цл} &= \mathbf{x}_0^T \Theta_l(t_0) \mathbf{x}_0, l=1,2; \\
J_{BCi} &= \mathbf{x}_0^T \Theta_i(t_0) \mathbf{x}_0, i = \overline{1,3}, \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0).
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Певне наближення в методах отримання ІРІДІШ, яке дозволяє вирішити задачу в загальному випадку визначення (2.33) - (2.35), ґрунтується на стратегіях у вигляді наближеного програмно-коректуючого закону управління (ПКЗУ) і його параметризації на програмному такті ПКЗУ.

В окремому випадку, відповідно до змісту прикладного завдання роботи, вектор управління набуває вигляду керуючих параметрів:

$$U(t) = q, (q^1, \dots, q^N) \in Q = (Q_1 \times \dots \times Q_N), \tag{2.42}$$

де $q^i \in Q_i$ – підвектор параметрів i -го об'єкта (каналу) ББС:

$$Q_i = \left\{ q_L^i \leq q^i \leq q_H^i \right\}, q_L^i, q_H^i \in E^{(r_i)}; C_i = [s_i \times r_i]; b^i = [s_i \times 1]. \tag{2.43}$$

Векторний цільовий показник i -го об'єкта (каналу) ББС приймає векторний або скалярний вигляд:

$$\begin{aligned} J^i &= (J_1^i, \dots, J_l^i), J^i = \sum_{j=1}^l \alpha_j^i J_j^i, 0 \leq \alpha_j^i \leq 1, \sum_{j=1}^l \alpha_j^i = 1; \\ J_j^i &= \Phi_j^i(t_k, x(t_k)) + \int_{t_0}^{t_k} F_j^i(t, x, u_1, \dots, u_N) dt, i=1, N. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Отримані закони управління на рівнях наведення і стабілізації є функціями, які залежать від часу, параметрів простору станів і керуючих параметрів на кожному з рівнів.

$$\begin{aligned} u_1 &= u_1(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t); u_2 = u_2(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t); \\ v_1 &= v_1(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t); v_2 = v_2(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t); v_3 = v_3(\mathbf{k}, \mathbf{u}, \mathbf{x}, t), \end{aligned}$$

де $\mathbf{k} = (\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{BC})$. Дані залежності відповідають виразам (2.37) і (2.39).

При цьому оптимальні рівноважні показники (2.41) будуть функціями від керуючих параметрів:

$$\begin{aligned} J_{Цl} &= J_{Цl}(\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{BC}), l=1, 2; \\ J_{BCi} &= J_{BCi}(\mathbf{k}_{Ц}, \mathbf{k}_{BC}), i = \overline{1, 3}. \end{aligned}$$

Після отримання законів управління і функцій вигравів в результаті ієрархічного врівноваження з порівневим балансуванням здійснюється перехід до уточнення керуючих параметрів на кожному з рівнів ієрархії. На підставі рівноважно-арбітражної схеми Неша здійснюється параметрична Парето-оптимізація.

Ця схема дає результат в точці області Парето, найбільш близької до точки балансування ББС. У цьому полягає сенс узагальненого СТЕК застосовуваного в задачі оптимізації двоканальної системи. Проведений аналіз методів оптимізації ББС дозволяє сформулювати наступну трьохетапну алгоритмічну структуру узагальненого СТЕК в задачі оптимізації багатоканальної системи наведення-стабілізації з перехресними зв'язками із забезпеченням балансування і граничної ефективності.

2.5 Рішення параметризованої задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізація» літального апарату на основі КОСТЕК з адаптацією керуючих параметрів системи стабілізації

Розвиваючи варіанти вирішення 2 і 3 задачі синтезу оптимального закону керування ієрархічною системою (п. 2.3) розглядається застосування отриманого алгоритму до вирішення загального завдання синтезу, коли модель представлена в загальному вигляді, без урахування лінеаризації, з урахуванням всіх нелінійностей. При заданому технічному вигляді моделі наведення-стабілізації немає необхідності знаходити вигляд керуючих законів. В якості опису використовується нелінійна модель руху БПЛА.

Структури законів управління на обох рівнях ієрархії, таким чином, задані як функції параметрів на кожному з рівнів $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t)$ і $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t)$.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (u_1, u_2); \\ \begin{cases} u_1 = n_{y\text{зад}} = n_{y\text{зад}}(k_{y1}, k_{k1}); \\ u_2 = n_{z\text{зад}} = n_{z\text{зад}}(k_{y2}, k_{k2}); \end{cases} \\ \mathbf{v} &= (v_1, v_2, v_3); \\ \begin{cases} v_1 = \delta_B = \delta_B(k_{\omega z}, k_{ny}, k_{sny}); \\ v_2 = \delta_H = \delta_H(k_{\omega y}, k_{nz}, k_{snz}); \\ v_3 = \delta_E = \delta_E(k_{\omega x}, k_{\gamma}, k_{s\gamma}). \end{cases} \end{aligned}$$

Рішення задачі оптимального управління ієрархічною системою зводиться до знаходження оптимальних значень керуючих параметрів на рівні наведення і рівні стабілізації, що володіють координаційними властивостями для рівня стабілізації, на основі ІРІДІШ або ІРІДІШ-РАА.

Виконаємо дослідження процесів оптимального управління високоманевреним МАС як ієрархічною системою наведення-стабілізації з урахуванням перехресних зв'язків каналів наведення і стабілізації МАС, багатокритеріальних вимог до каналів наведення і стабілізації МАС, наближеною і точною траєкторною адаптацією ССт,

корекції траєкторії для підвищення якості адаптивної стабілізації і збурень. Показники ефективності на рівні наведення мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\Pi 11}(t_k) = -V_y^2(t_k) \rightarrow \min; \\ J_{\Pi 21}(t_k) = (Y_{\Pi} - Y(t_k))^2 \rightarrow \min; \\ J_{\Pi 31}(t_k) = \left(\Theta(t_k) + \frac{\pi}{2} \right)^2 \rightarrow \min; \\ J_{\Pi 12}(t_k) = -(V_x^2(t_k) + V_z^2(t_k)) \rightarrow \min; \\ J_{\Pi 22}(t_k) = (X_{\Pi} - X(t_k))^2 + (Z_{\Pi} - Z(t_k))^2 \rightarrow \min; \\ J_{\Pi 32}(t_k) = \left(\Psi(t_k) - \arcsin \frac{(Z_{\Pi} - Z(t_0))}{\sqrt{(X_{\Pi} - X(t_0))^2 + (Z_{\Pi} - Z(t_0))^2}} \right)^2 \rightarrow \min. \end{array} \right.$$

В рамках даного параграфа розглядається застосування методу оптимізації ієрархічної системи наведення-стабілізації МАС з адаптацією параметрів зі швидкісного напору на рівні стабілізації (варіант 3, п. 2.3). Дана адаптація задана наближеними залежностями від швидкісного напору або багатовимірними інтерполяційними поверхнями на області застосовності МАС, що характеризують залежності параметрів ССт від швидкості і висоти, і реалізованими на борту МАС.

У наближеному варіанті опису коефіцієнти адаптації на рівні стабілізації змінюються по заданим залежностям від функції швидкісного напору, отриманих емпіричним шляхом:

$$\begin{aligned} k_{sny} &= -4,127860011 \cdot 10^{-16} q^3 + 3,56653912 \cdot 10^{-10} q^2 \\ &\quad - 9,415273612 \cdot 10^{-5} q + 8,577155821; \\ k_{ny} &= -2,021340965 \cdot 10^{-16} q^3 + 17,44740932 \cdot 10^{-11} q^2 \\ &\quad - 4,717643091 \cdot 10^{-5} q + 4,87734982; \\ k_{\omega z} &= -2,445720612 \cdot 10^{-17} q^3 + 1,261287093 \cdot 10^{-11} q^2 \\ &\quad - 2,314901566 \cdot 10^{-6} q + 0,2752995409 \\ k_{\omega y} &= k_{\omega z}; k_{snz} = k_{sny}; k_{nz} = k_{ny}; \\ k_{s\gamma} &= 1; k_{\gamma} = 1; k_{\omega x} = 0,2. \end{aligned} \tag{2.45}$$

В точному варіанті опису параметри системи стабілізації задані як залежності від числа Маха і висоти, отримані в ході оптимізації трьохканальної системи стабілізації з

перехресними зв'язками. Дані отримані в ході оптимізації трьохканальної ССт з перехресними зв'язками.

Ефективність функціонування кожного каналу ССт оцінюється векторним показником ефективності, що враховує статичну точність, коливальність, швидкодію, стійкість.

При вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації параметрів ССт для оцінки ефективності функціонування кожного каналу ССт використовувався комплексний показник, який представляє собою лінійну згортку показників статичної точності, коливальності, швидкодії, стійкості. Таким чином, критерій оптимізації має наступний вигляд:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{\vartheta} \\ \Phi_{\Psi} \\ \Phi_{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\vartheta} \cdot J_{BCj1} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\Psi} \cdot J_{BCj2} \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_{j\gamma} \cdot J_{BCj3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_j^1 \cdot J_j^1 \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_j^2 \cdot J_j^2 \\ \sum_{j=1}^4 \alpha_j^3 \cdot J_j^3 \end{bmatrix} \rightarrow \min, \quad (2.46)$$

де кожен компонент вектору визначається як сума нормованих показників з ваговими коефіцієнтами, які враховують значимість кожного скалярного показника в каналі ССт.

Таким чином, при вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації параметрів трьохканальної ССт розмірність оптимізуемого векторного показника ефективності ССт дорівнює 3; розмірність вектору змінних параметрів ССт дорівнює 9. Оптимізація проводилася в 16 опорних точках на робочій області.

У процесі рішення визначаються рівноважно-арбітражні оптимальні параметри на рівні наведення з урахуванням бортової реалізації адаптації на рівні стабілізації в залежності від формованої траєкторії польоту МАС. Результатом застосування алгоритму є спільне отримання оптимальних параметрів на рівні наведення і рівні стабілізації по багатокритеріальним вимогам на обох рівнях ієрархії. В рамках дослідження розглядається два методи отримання Парето-оптимального рішення.

Перший спосіб ґрунтується на знаходженні утопічної точки, координати якої відповідають мінімальним значенням згорнутих показників в кожному з каналів наведення. Далі знаходиться точка найбільш близька до утопічної, що володіє властивістю оптимальності за Парето.

Другий спосіб визначення Парето-оптимального рішення ґрунтується на застосуванні двоетапного рівноважно-арбітражного алгоритму.

Значення параметрів в критерії стійкості, в загальному випадку, повинні вибиратися на основі D розбиття простору параметрів. Однак, складність структури системи наведення, що включає нелінійність типу обмежень і перехресні зв'язки, обумовлює великий порядок рівняння границі D -розбиття. Крім того, представлення області стійкості в 4-вимірному просторі є неінформативним для вибору точки, що знаходиться на достатній відстані від границі стійкості.

З метою подолання перерахованих вище труднощів був використаний оптимізаційний метод на основі алгоритму Хука-Дживса, що дозволяє послідовно отримувати діапазони параметрів і точку, рівновіддалену від границь стійкості.

Метод Хука-Дживса служить для пошуку безумовного локального екстремуму функції і відноситься до прямих методів, тобто спирається безпосередньо на значення функції. Алгоритм ділиться на дві фази: досліджуючий пошук і пошук за зразком.

Досліджуючий пошук. На початковому етапі задається стартова точка (позначимо її 1) і кроки h_i по координатах. Потім заморожуються значення всіх координат крім 1-ї, обчислюється значення функції в точках $x_1 + h_1$ і $x_1 - h_1$ (де x_1 – перша координата точки, а h_1 – відповідно значення кроку по цій координаті) і вибирається точка з найменшим значенням функції. У цій точці заморожуються значення всіх координат крім 2-ї, обчислюється значення функції в точках $y_1 + h_2$ і $y_1 - h_2$, вибирається точка з найменшим значенням функції і алгоритм продовжується для всіх координат (див. рисунок 2.6). Коли кроки по всіх координатах h_i стануть менші відповідних значень точності ε , алгоритм завершується, і точка 1 визнається точкою мінімуму.

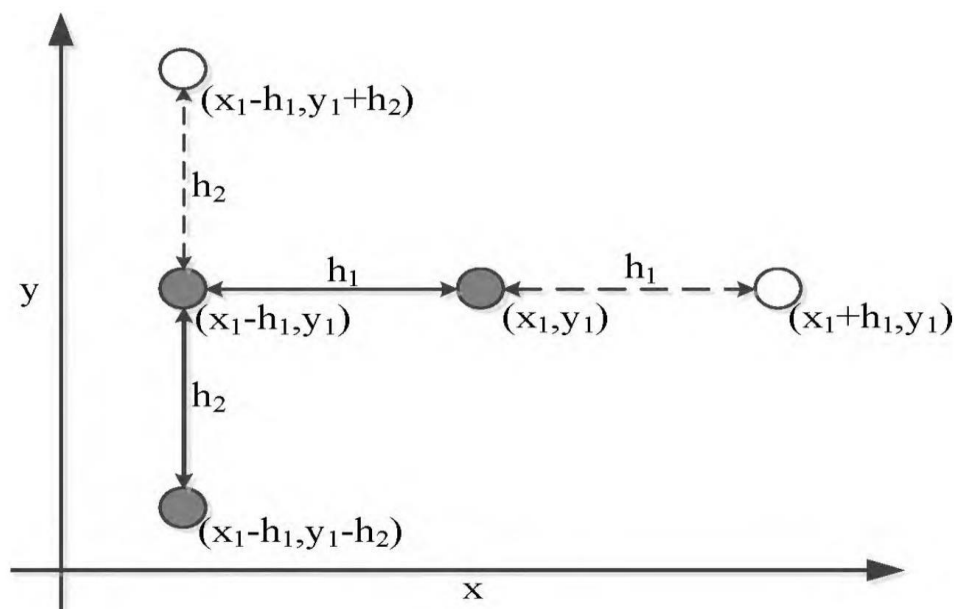


Рисунок 2.6 – Ілюстрація першого етапу алгоритму для двох координат

Таким чином, провівши досліджувачий пошук за всіма координатами, була отримана нова точка з найменшим значенням функції (позначимо її 2). Тепер можна здійснити перехід до 2-ї фази алгоритму.

Пошук за зразком. На етапі пошуку за зразком відкладається точка 3 в напрямку від 1 до 2 на тій же відстані. Її координати знаходяться за формулою:

$$\bar{x}_3 = \bar{x}_1 + \lambda \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x}_1),$$

де x_i – точка з номером i ; λ – параметр алгоритму, який вибирається рівним 2. Потім в новій точці 3 проводиться досліджувачий пошук, як на 1-й фазі алгоритму, за винятком того, що крок на цій фазі не зменшується.

Якщо на цій фазі в результаті досліджувачого пошуку вдалося отримати точку 4 (див. рисунок 2.7), відмінну від точки 3, то точку 2 перепозначимо на 1, а 4 на 2 і повторимо пошук за зразком. У разі якщо не вдається знайти точку 4, відмінну від точки 3, то точку 2 перепозначимо на точку 1 і повторимо 1-у фазу алгоритму – досліджувачий пошук.

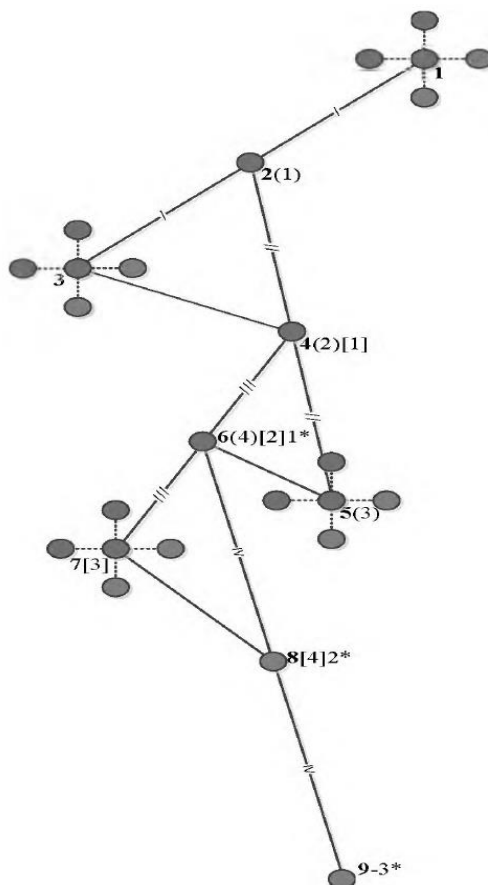


Рисунок 2.7 – Ілюстрація другого етапу алгоритму для двох координат

З урахуванням виду представленого вище алгоритму досліджуючого пошуку можна побудувати діаграму станів для обчислювального процесу алгоритму цілком на 9 точках, як показано вище на рисунку 2.7.

Висновки по другому розділу

В рамках другого розділу удосконалено метод оптимізації ієрархічних систем управління на основі координованих стабільно-ефективних компромісів.

На підставі розглянутої методики оптимізації структурно і функціонально складних АСУ в типовій формі багаторівневої ієрархічної структури з порівневими багатопідсистемними багатокритеріальними системами сформовано визначення узагальненого оптимального управління багаторівневої АСУ, яка одержується в результаті застосування методу триетапної ітераційно зв'язаної оптимізації ІРСУ.

Розглядається ітераційна пов'язана процедура оптимізації управління на основі рівноважно-арбітражного алгоритму (РАА) на ББС-рівнях і алгоритму отримання міжрівневих координацій на основі узагальненої ієрархічної рівноваги ієрархічної диференціальної гри за Штакельбергом (ІРІДІШ). При узагальненні даної двоетапної методики ІРІДІШ-РАА формуються оптимальні закони координації та виконавчого управління з подальшим вибором параметрів, що забезпечують балансування, і Парето-оптимальність координації та виконання на основі РАА СТЕК. На відміну від відомих результатів і відповідно до структурного вигляду даної задачі, представленим в даному розділі, верхній рівень являє собою структуровану ББС з вихідною структурною неузгодженістю.

В рамках другого розділу досліджені два варіанти вирішення задачі оптимального управління ієрархічною системою:

1. Розв'язана задача синтезу оптимального закону керування ІРС в лінійно-квадратичній постановці;
2. У практичних завданнях при заданому технічному вигляді системи на обох рівнях ієрархії для керуючих впливів можуть бути використані функціональні залежності від стану і параметрів. На підставі цих залежностей сформовані і вирішені параметризовані завдання отримання узагальненого управління за Штакельбергом і його рівноважно-арбітражного узагальнення.

Теоретичний розв'язок дозволяє перевірити правильність розрахунків в симуляційній системі, що і буде зроблено в наступному розділі.

З БАГАТОФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИМАЛЬНОЇ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ «НАВЕДЕННЯ-СТАБІЛІЗАЦІЇ» БПЛА НА ОСНОВІ КООРДИНОВАНИХ СТАБІЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ КОМПРОМІСІВ

3.1 Результати рішення нелінійної задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізації» БПЛА на основі КОСТЕК з адаптацією системи стабілізації

Для аналізу результатів рішення нелінійної задачі синтезу оптимального управління дворівневої багатоканальної системи «наведення-стабілізації» безпілотного літального апарату на основі координованих стабільно-ефективних компромісів (КОСТЕК) з адаптацією системи стабілізації необхідно представити результати моделювання без урахування отримання оптимального рішення на рівні наведення керуючись розробленою теорією в пунктах 2.4, 2.5.

3.1.1 Варіант моделювання №0. Моделювання без урахування балансування каналів на рівні наведення

Точка старту має координати:

$$X(t_0) = 0 \text{ м}; Y(t_0) = 2500 \text{ м}, Z(t_0) = 0 \text{ м}.$$

Координати цілі приймаються рівними:

$$X_{Ц} = 4500 \text{ м}; Y_{Ц} = 0 \text{ м}, Z_{Ц} = 500 \text{ м}.$$

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

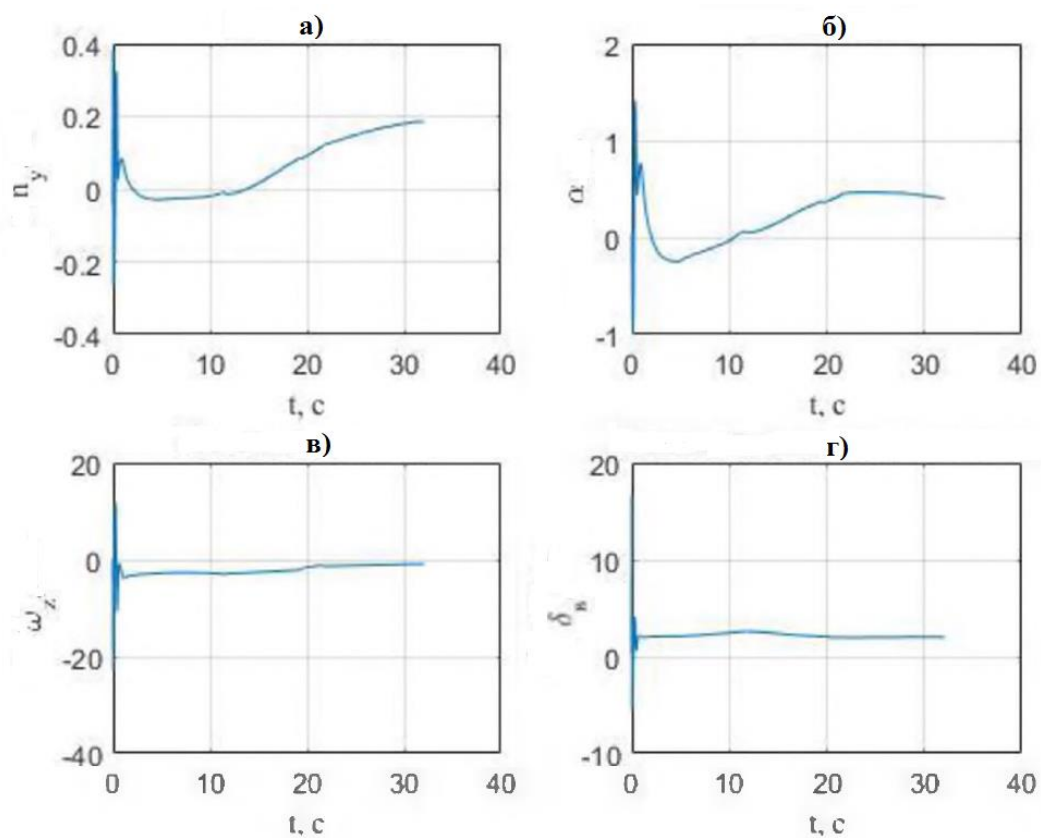


Рисунок 3.1 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти).

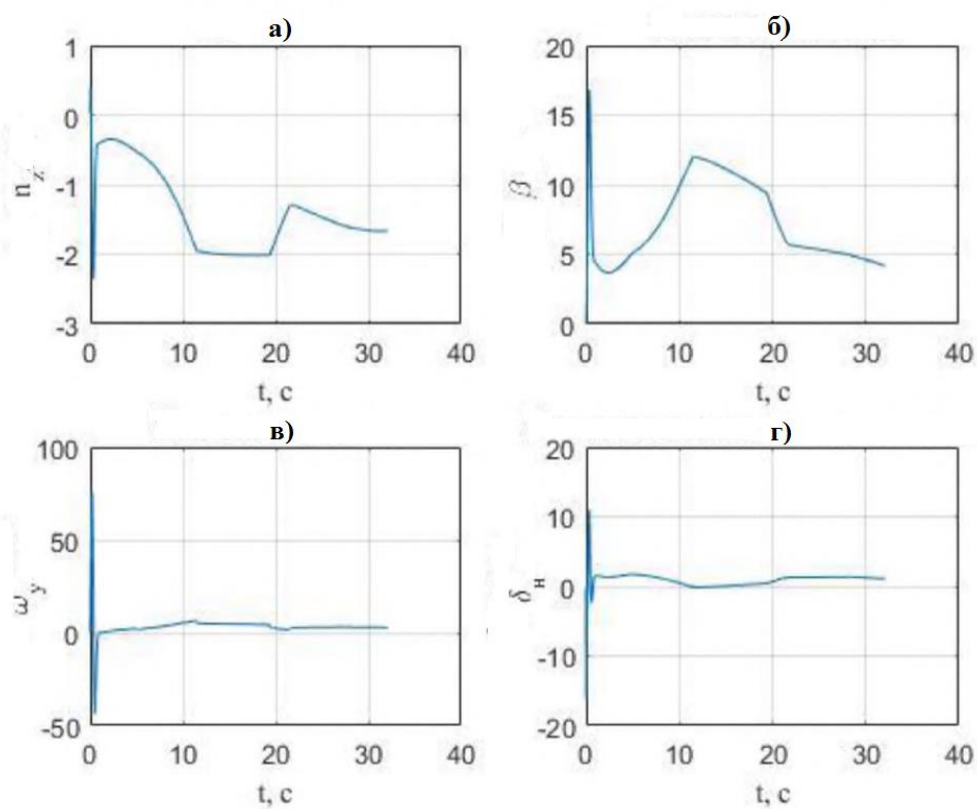


Рисунок 3.2 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

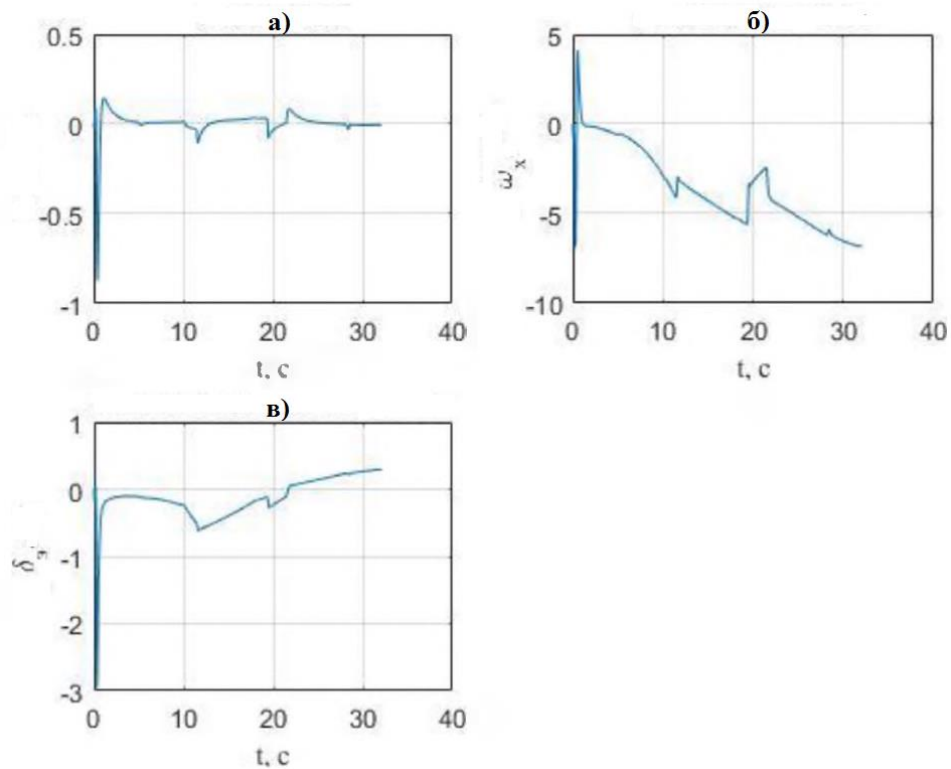


Рисунок 3.3 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

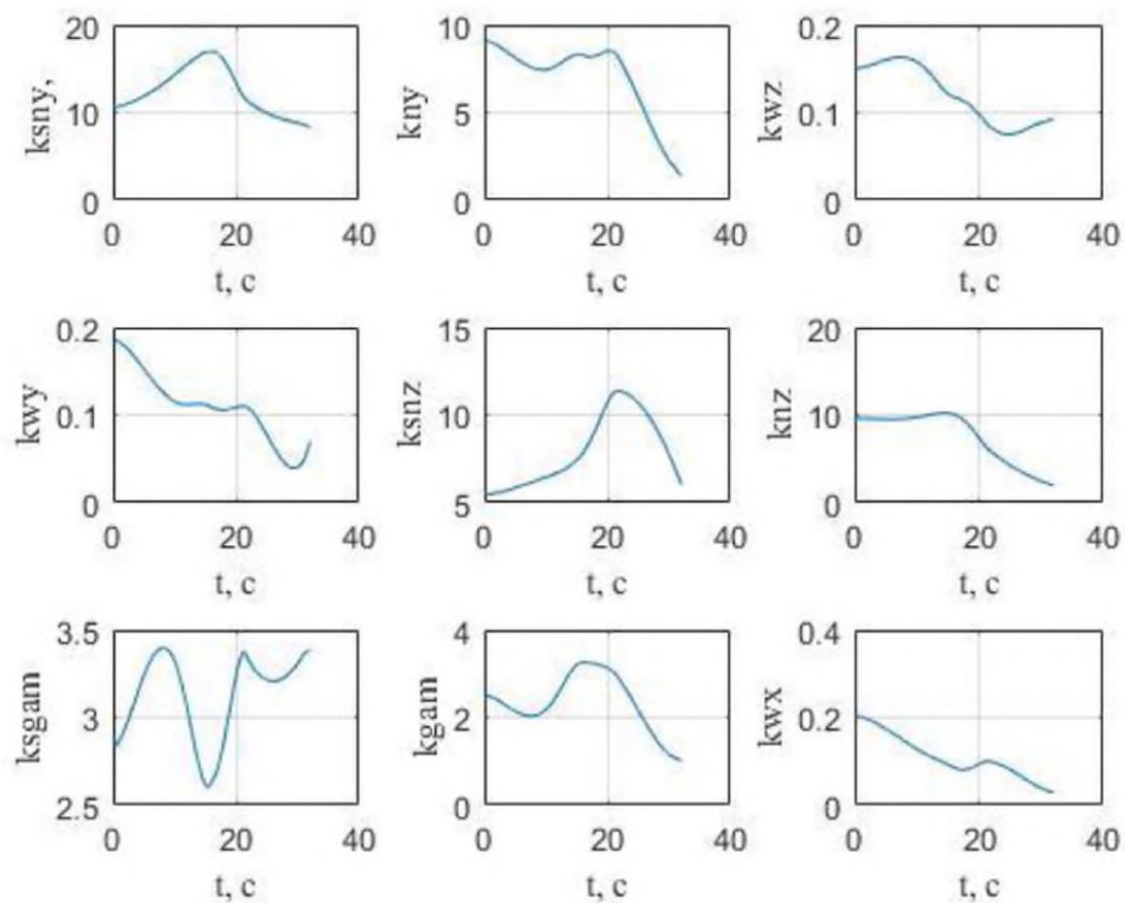


Рисунок 3.4 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

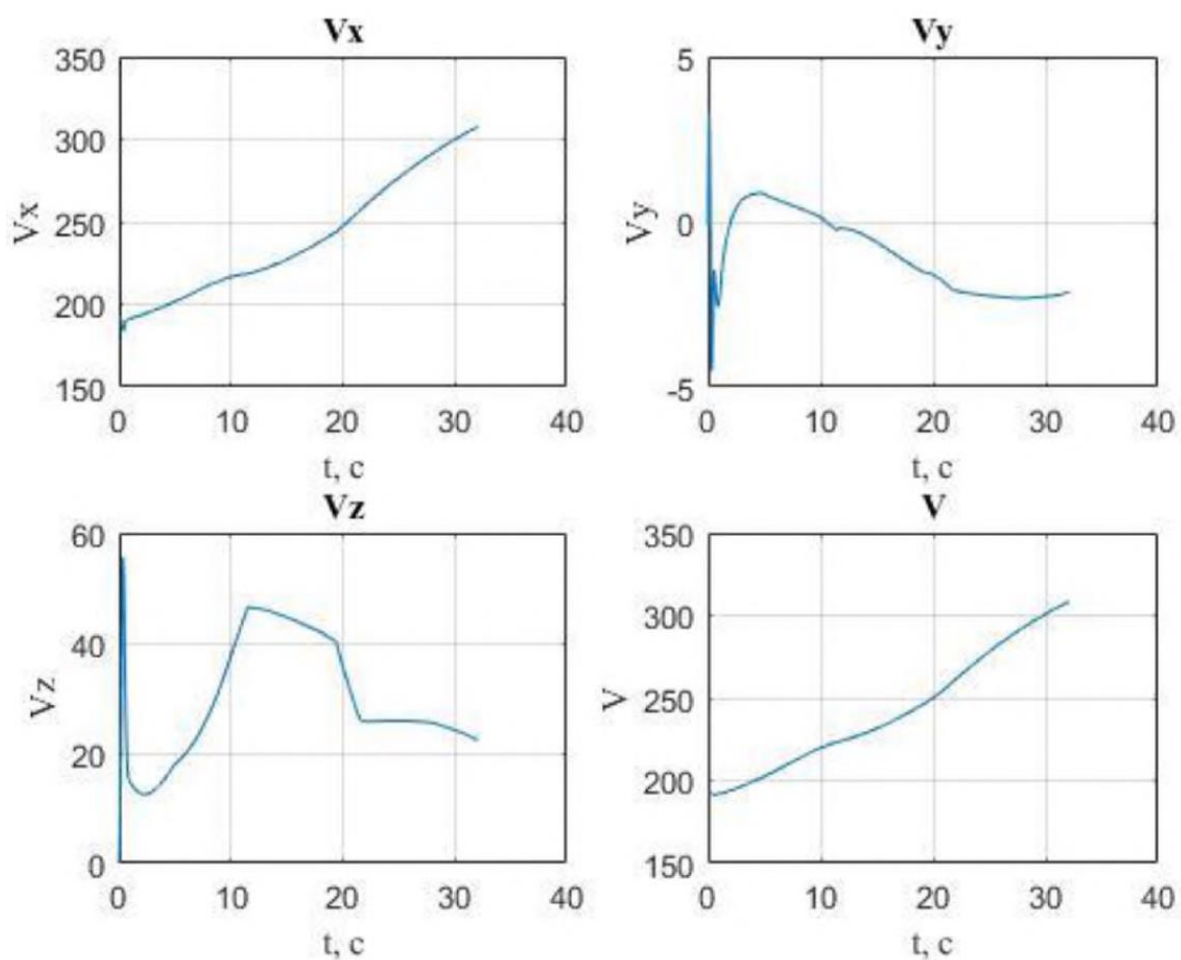


Рисунок 3.5 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

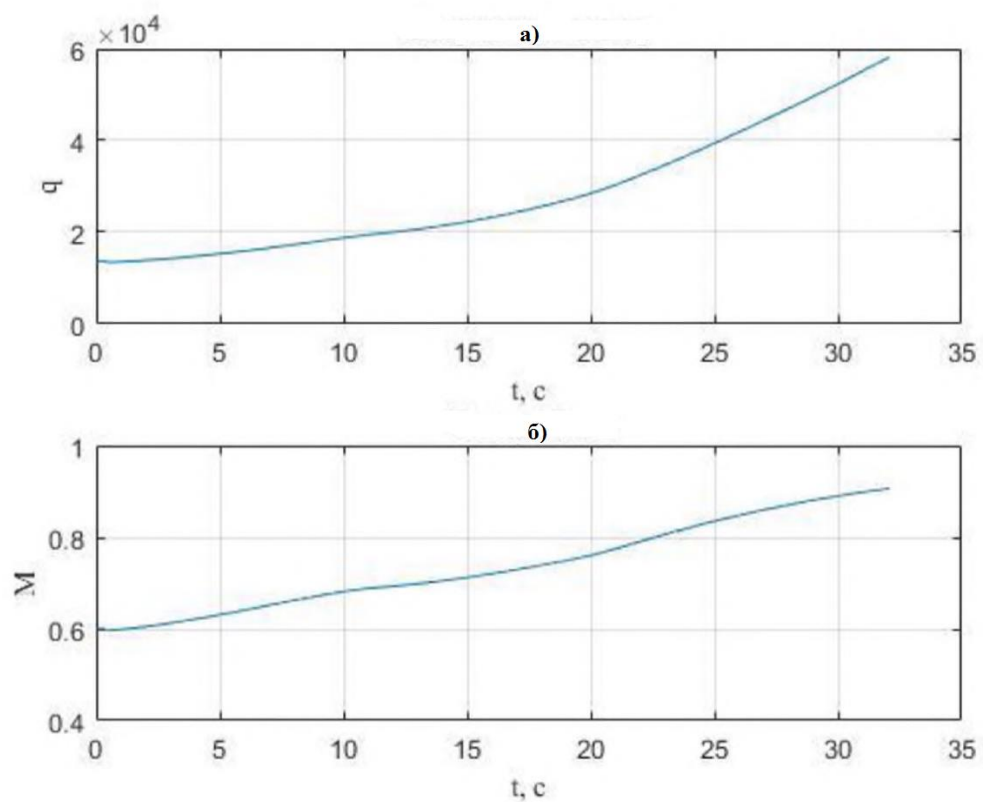


Рисунок 3.6 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=5; k_{y2}=3; k_{k2}=5$.

Значення векторного промаху: $\Delta X = 2,348 м; \Delta Y = -0,029 м; \Delta Z = 3,544 м$.

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -22,34^\circ; \Theta = -67,21^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 286,64 \frac{м}{с}; V_y = 2,547 \frac{м}{с}; V_z = -2,713 \frac{м}{с}.$$

Далі наводяться результати моделювання процесів оптимального управління із застосуванням методу оптимізації ієрархічної системи наведення-стабілізації для різних варіантів представлення опису залежностей коефіцієнтів адаптації, а також при використанні різних методів знаходження Парето-оптимального рішення, для різних початкових і термінальних умов.

3.1.2 Варіант моделювання №1. Базовий варіант

Точка старту має координати: $X(t_0)=0 м; Y(t_0)=2500 м, Z(t_0)=0 м$.

Координати цілі приймаються рівними: $X_{Ц}=4500 м; Y_{Ц}=0 м, Z_{Ц}=500 м$.

Опис параметрів ССт задано наближеними емпіричними залежностями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі знаходження утопічної точки.

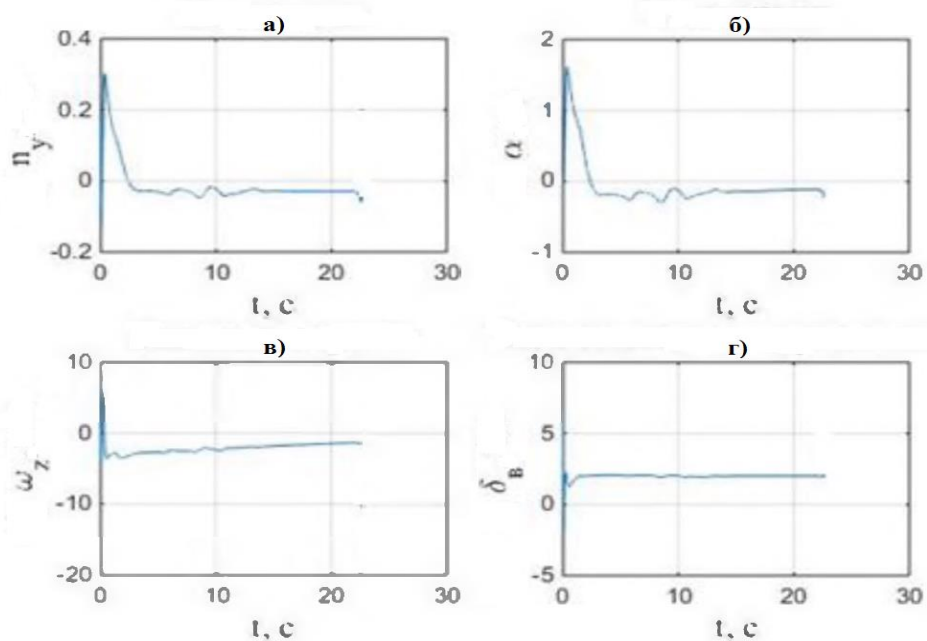


Рисунок 3.7 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

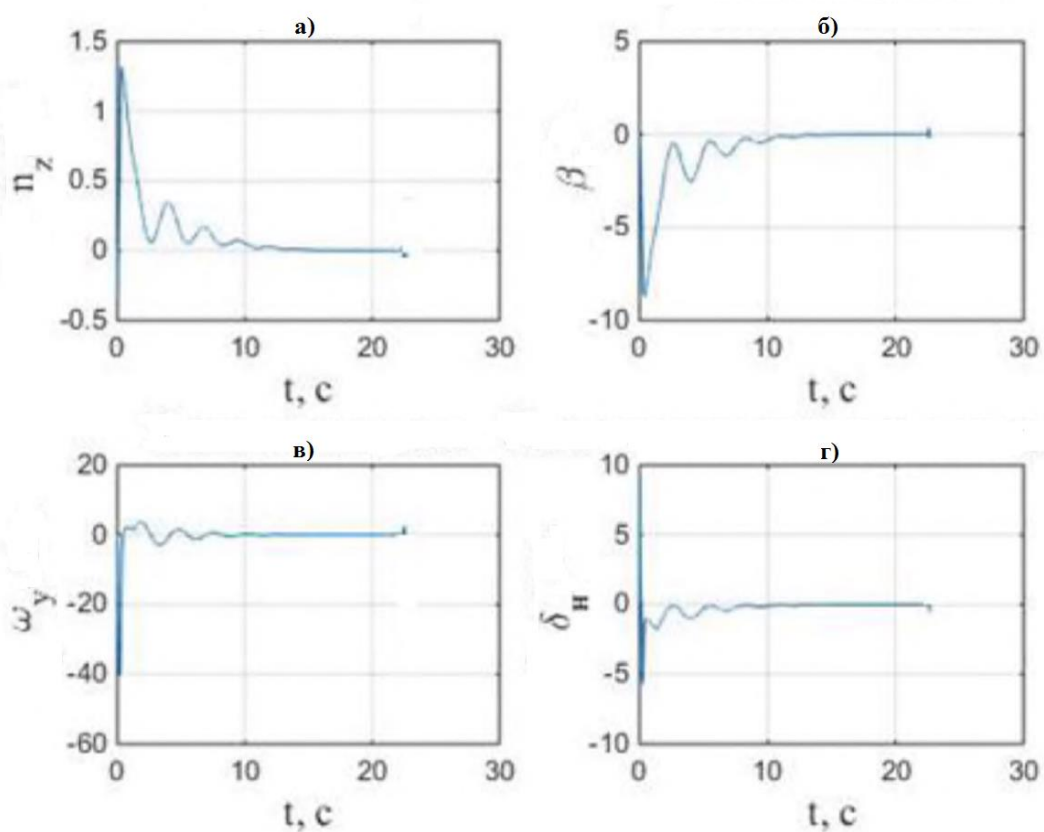


Рисунок 3.8 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма напрямлення)

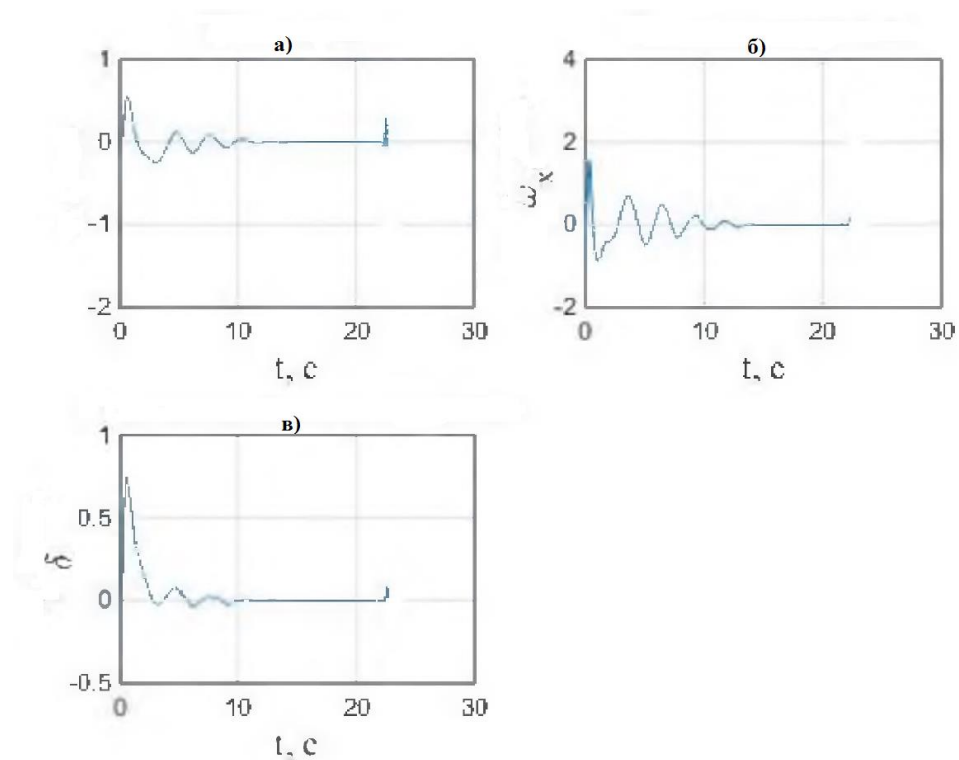


Рисунок 3.9 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

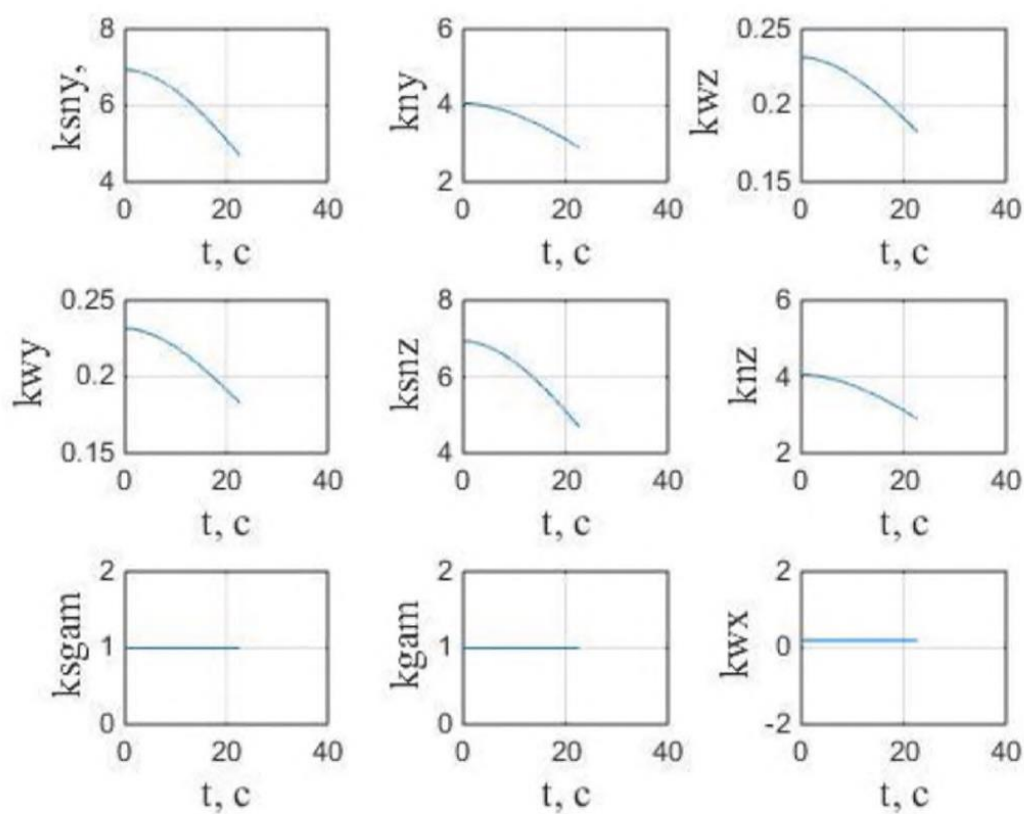


Рисунок 3.10 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

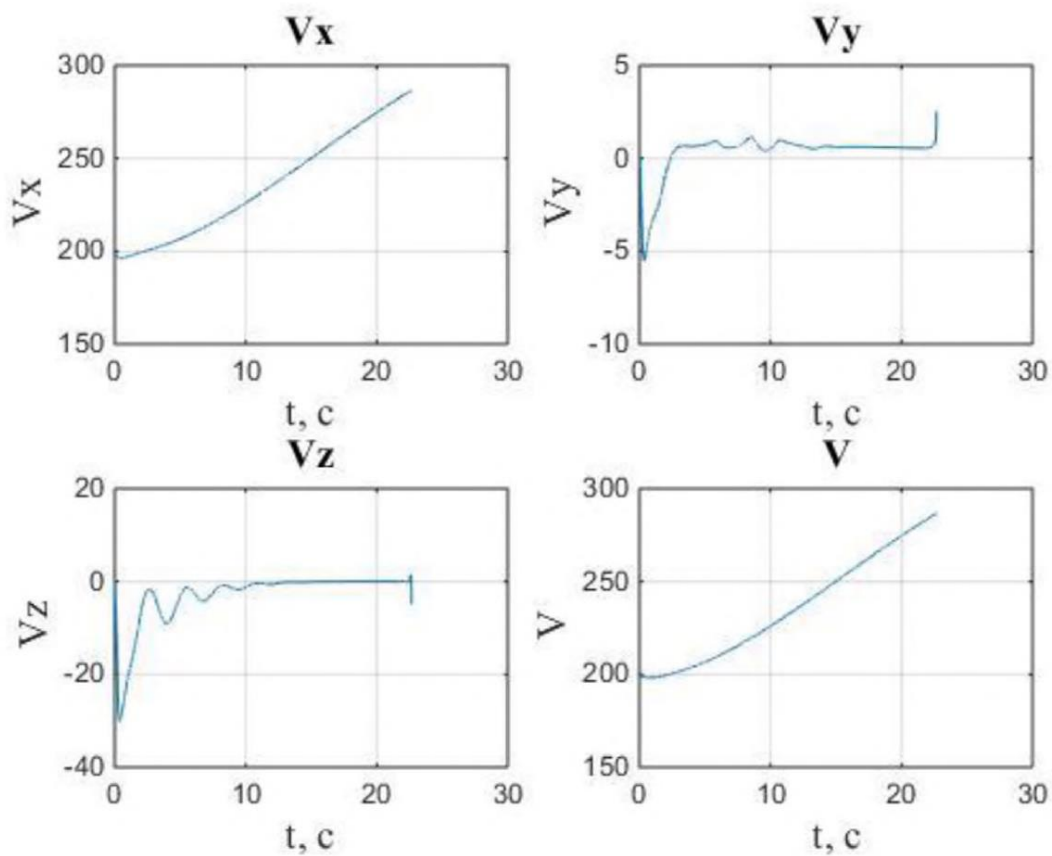


Рисунок 3.11 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

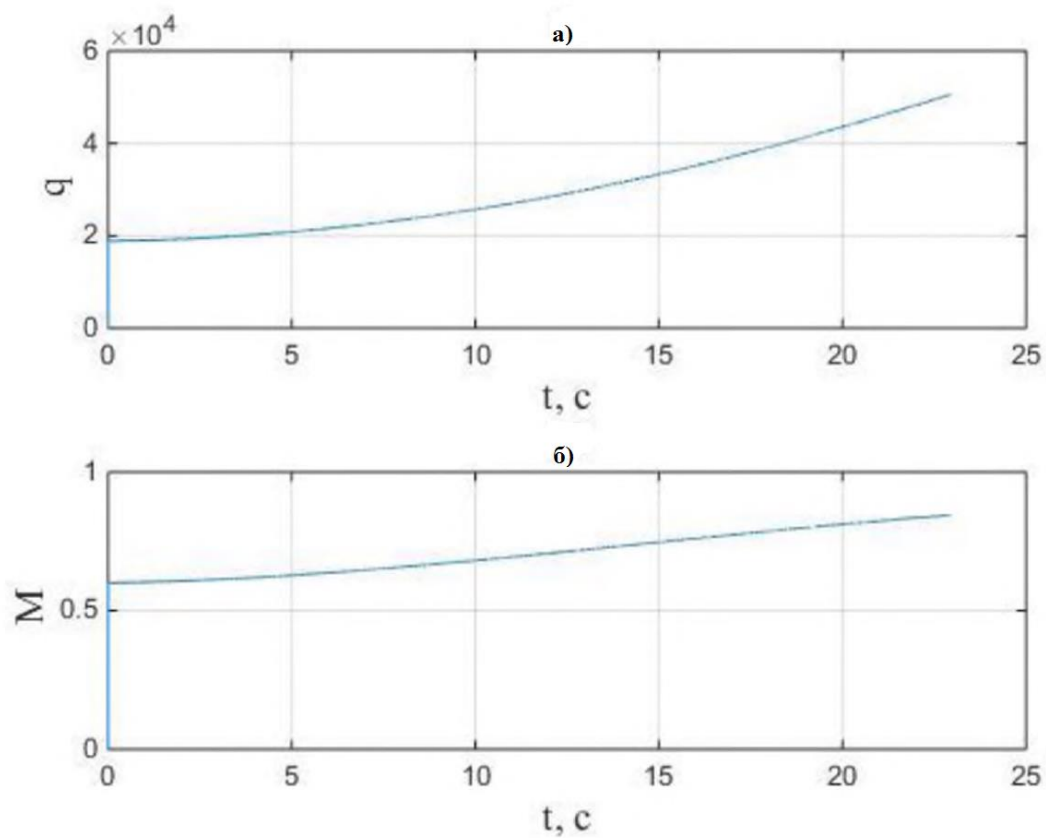


Рисунок 3.12 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=15; k_{y2}=12; k_{k2}=15$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,2338 \text{ м}; \Delta Y = -0,429 \text{ м}; \Delta Z = 0,0444 \text{ м}.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -7,17^\circ; \Theta = -48,02^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 289,311 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_y = 5,56 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_z = -7,797 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Результати показали, що без балансування каналів в дворівневій системі «наведення-стабілізації» і без забезпечення координації рівнів – якість системи стабілізації значно поступається варіанту, коли застосовувався алгоритм отримання оптимальної дворівневої системи «наведення-стабілізації» МАС на основі КОСТЕК в варіанті 3. І якість наведення відповідно до наведених вимог також поступається.

3.1.3 Варіант моделювання №2. Варіація отримання оптимального рішення на основі РАА

Точка старту має координати: $X(t_0)=0 \text{ м}; Y(t_0)=2500 \text{ м}, Z(t_0)=0 \text{ м}.$

Координати цілі приймаються рівними: $X_{Ц}=4500 \text{ м}; Y_{Ц}=0 \text{ м}, Z_{Ц}=500 \text{ м}.$

Опис параметрів ССт задано наближеними емпіричними залежностями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі застосування рівноважно-арбітражного алгоритму.

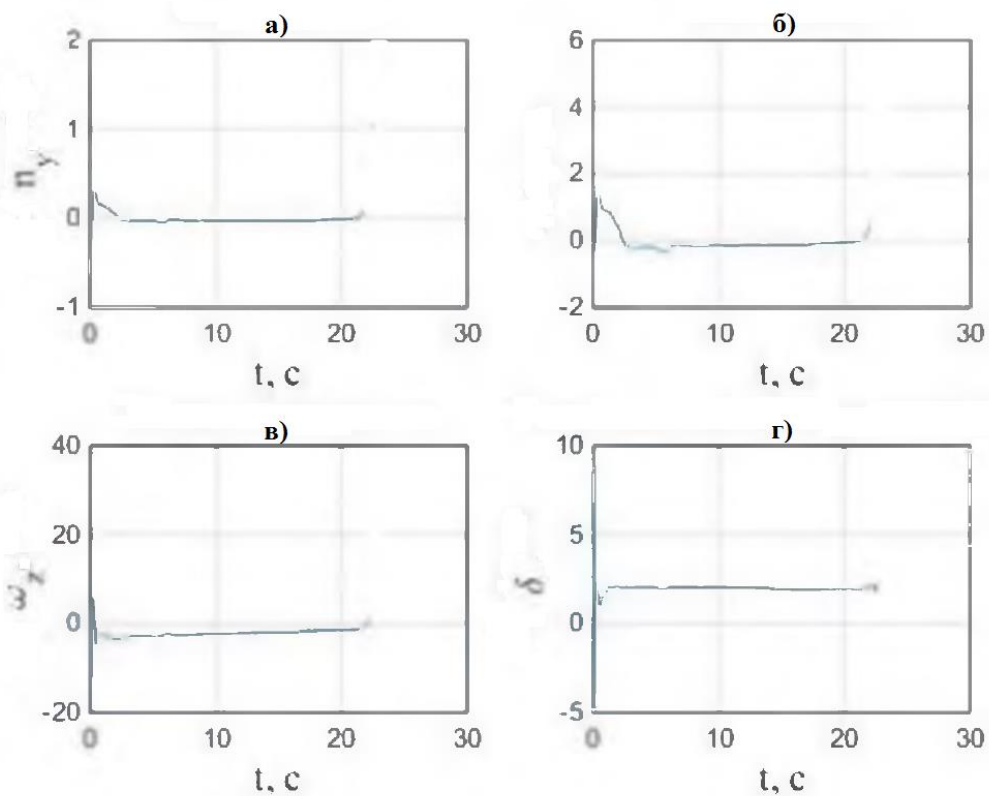


Рисунок 3.13 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

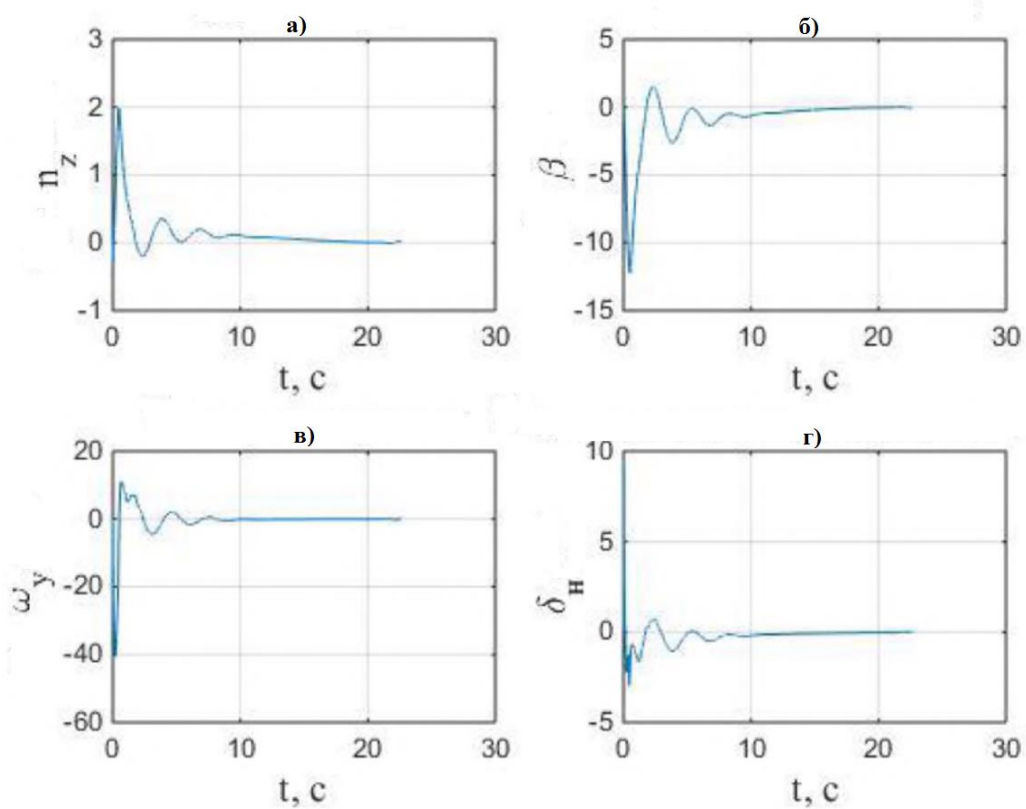


Рисунок 3.14 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

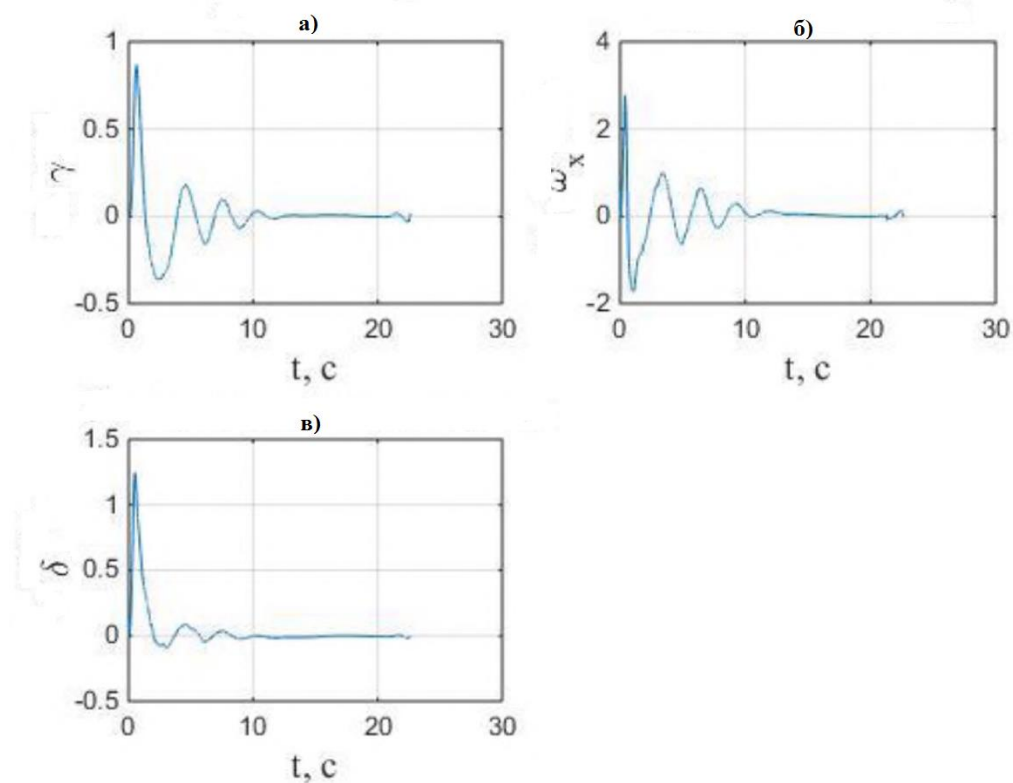


Рисунок 3.15 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

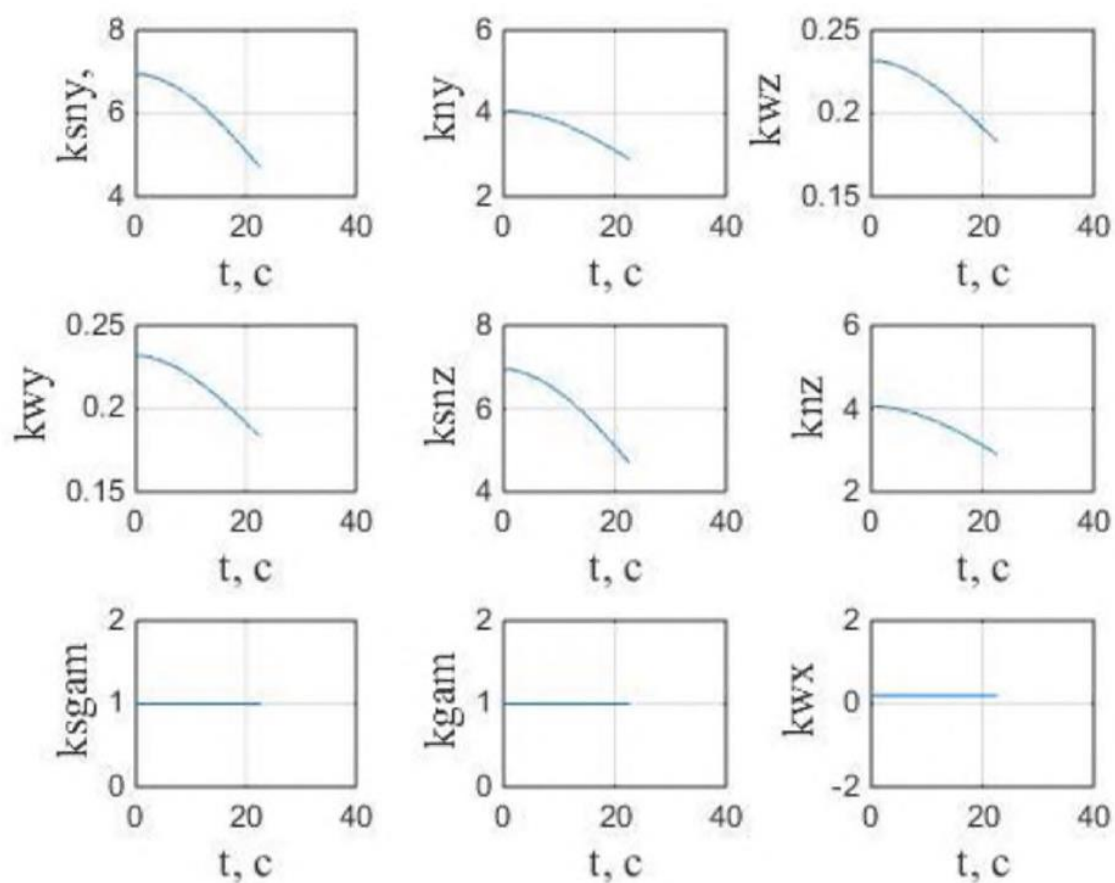


Рисунок 3.16 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

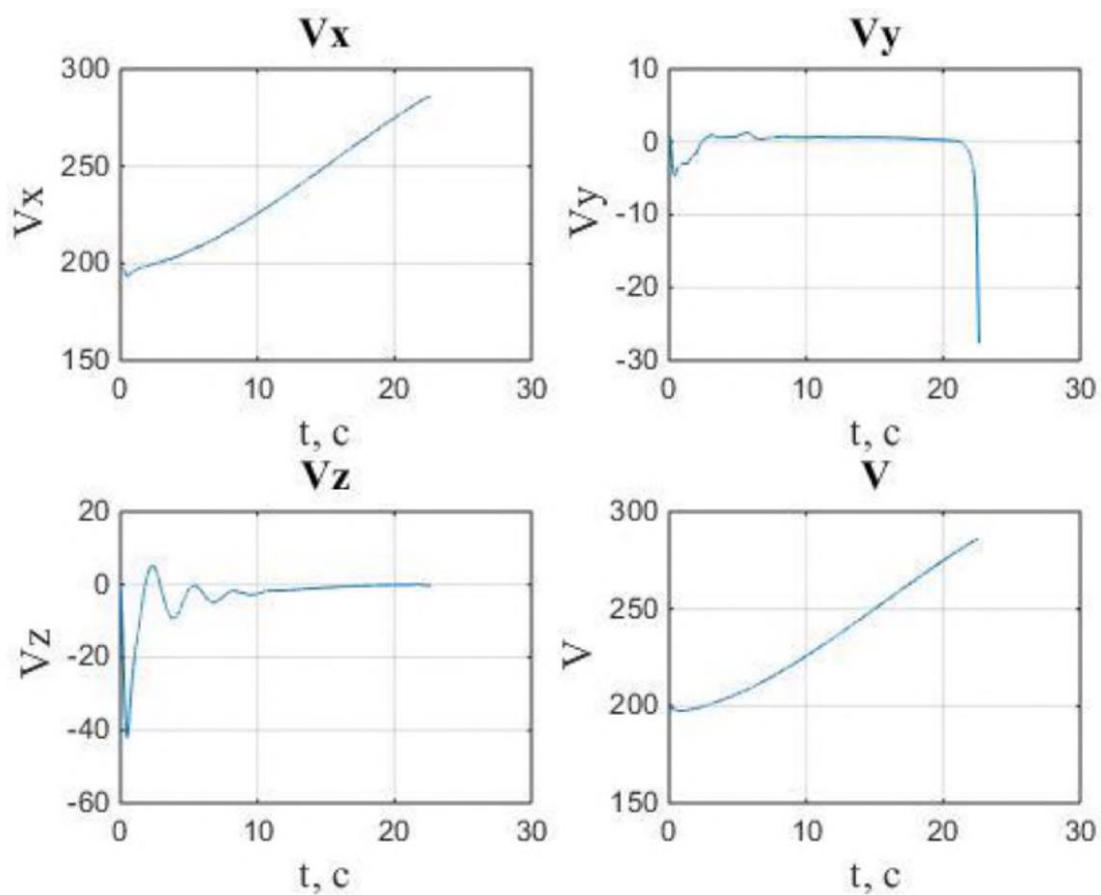


Рисунок 3.17 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

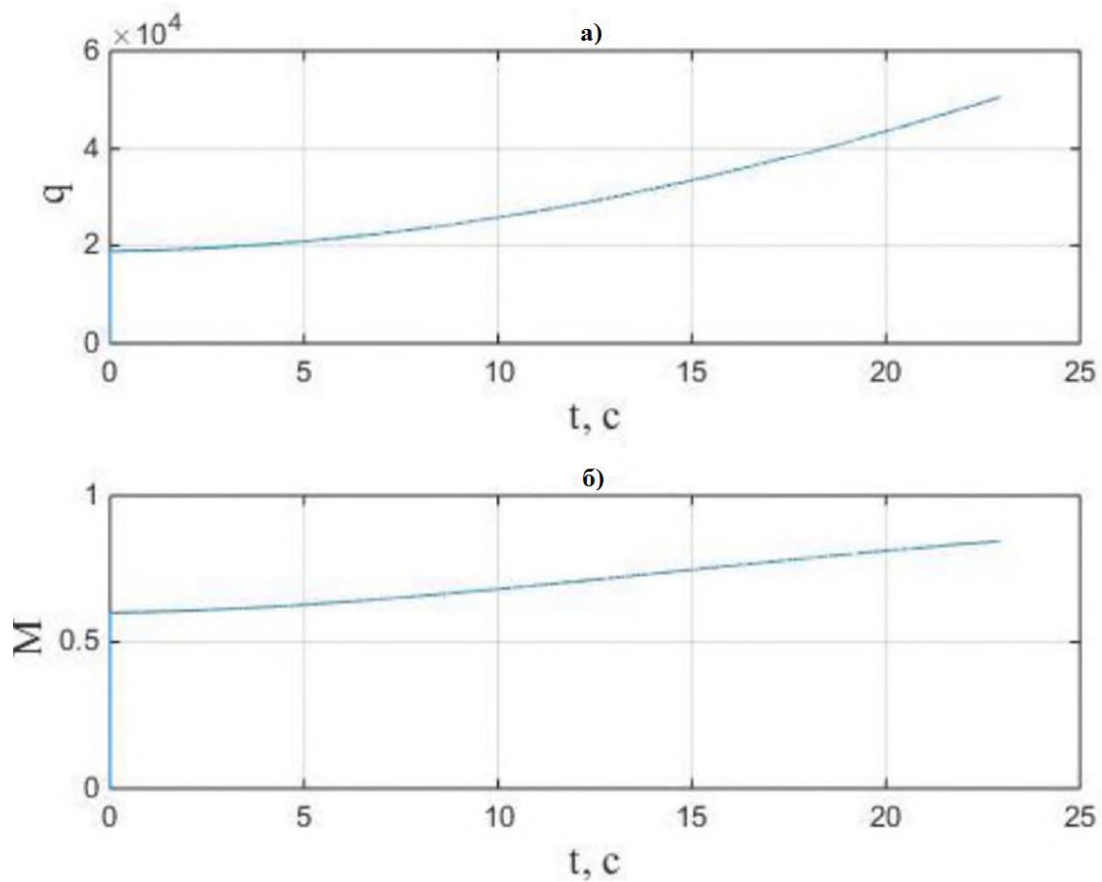


Рисунок 3.18 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=5; k_{y2}=6; k_{k2}=5$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,4314 м; \Delta Y = -0,423 м; \Delta Z = 0,1583 м.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -7,39^\circ; \Theta = -47,58^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 285,187 \frac{м}{с}; V_y = -27,638 \frac{м}{с}; V_z = -0,01675 \frac{м}{с}.$$

Різні способи знаходження оптимального рішення дають рівнозначні результати за якістю, точністю і швидкодією для випадку використання наближеного опису параметрів адаптації ССт.

3.1.4 Варіант моделювання №3. Варіація отримання оптимального рішення на основі РАА. Використання точного опису параметрів ССт

Точка старту має координати: $X(t_0) = 0 \text{ м}; Y(t_0) = 2500 \text{ м}, Z(t_0) = 0 \text{ м}$.

Координати цілі приймаються рівними: $X_{ц} = 4500 \text{ м}; Y_{ц} = 0 \text{ м}, Z_{ц} = 500 \text{ м}$.

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі застосування рівноважно-арбітражного алгоритму.

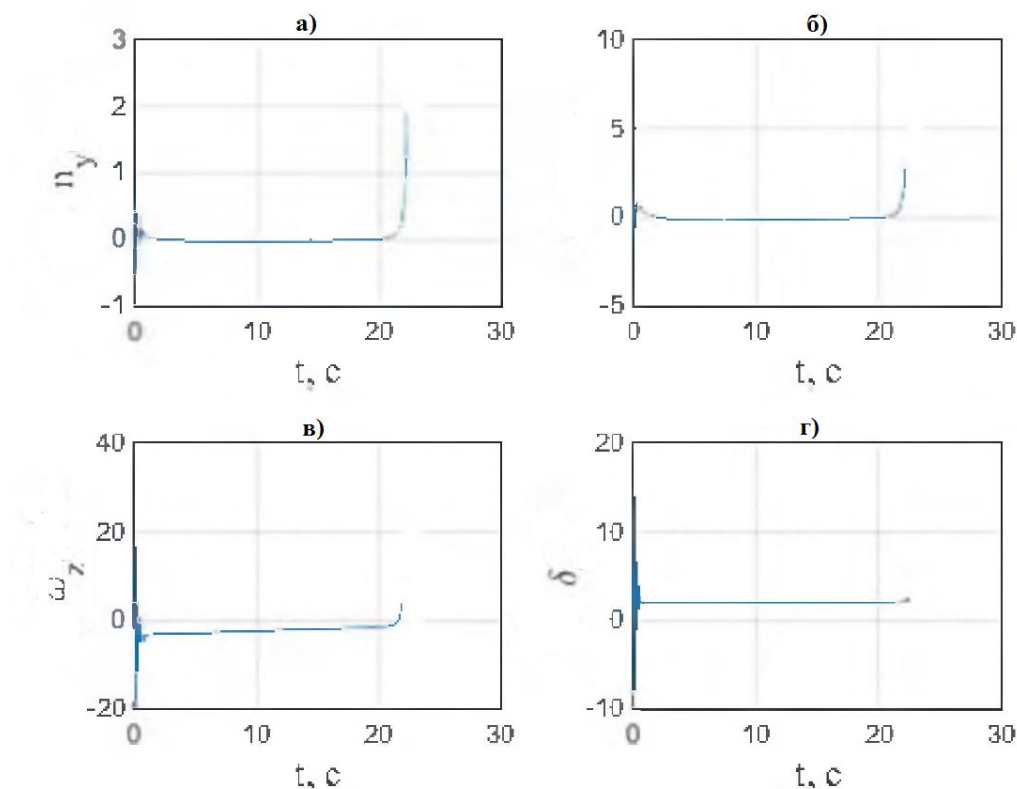


Рисунок 3.19 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

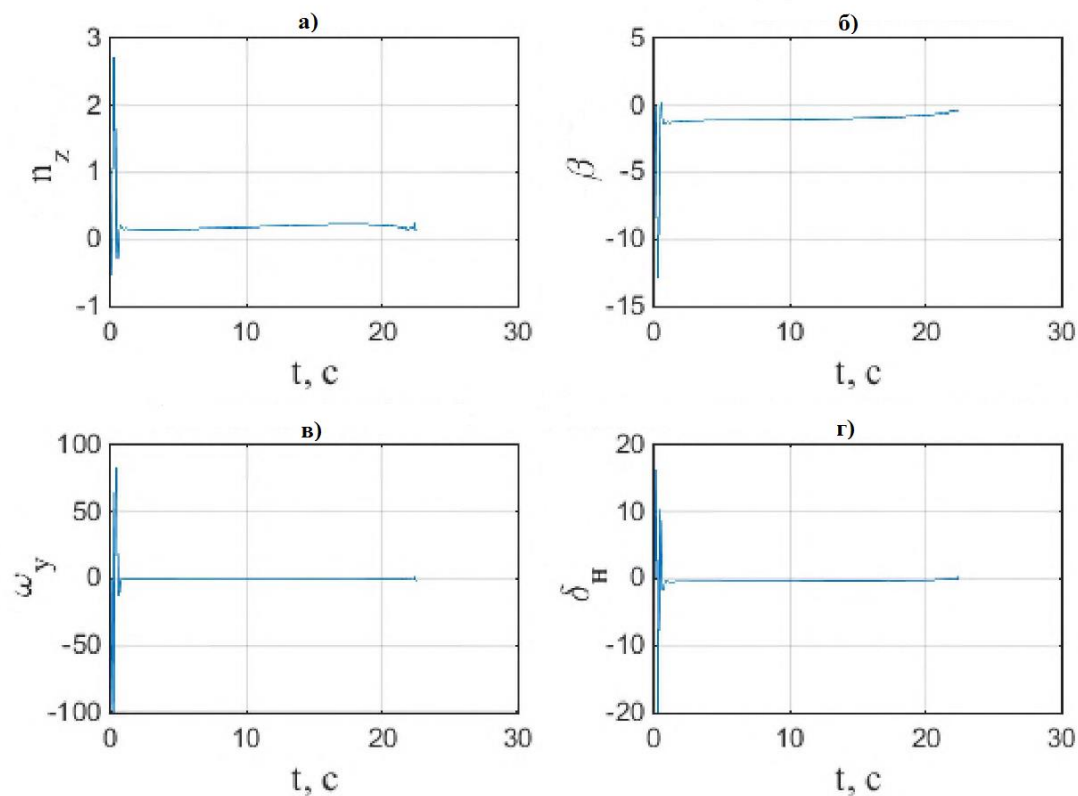


Рисунок 3.20 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма напрямлення)

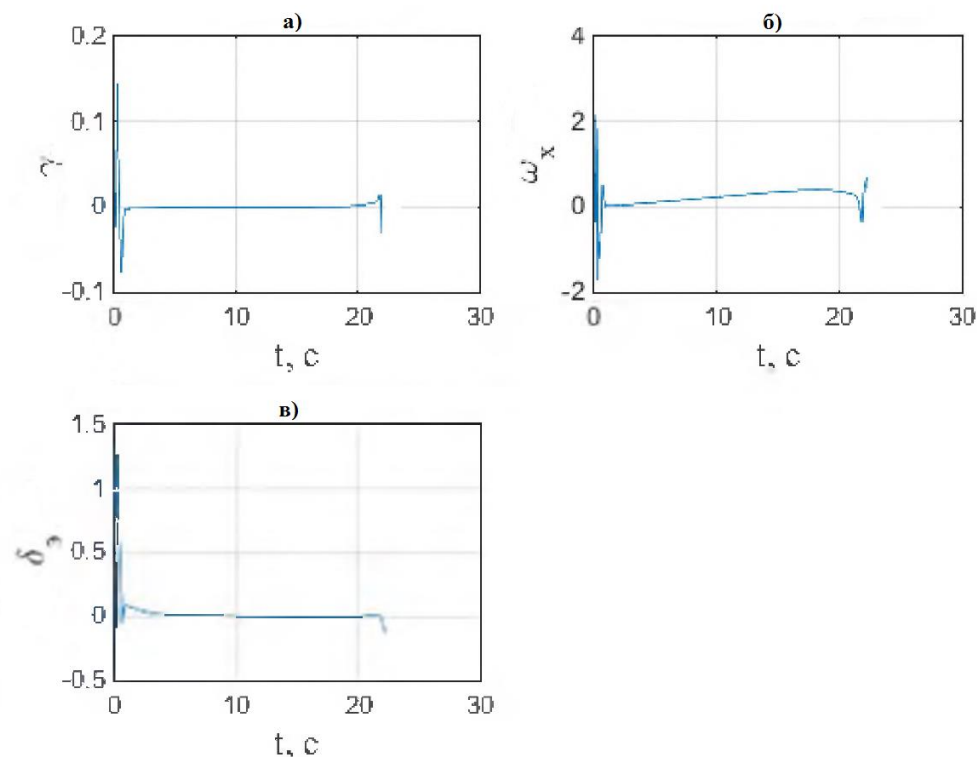


Рисунок 3.21 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

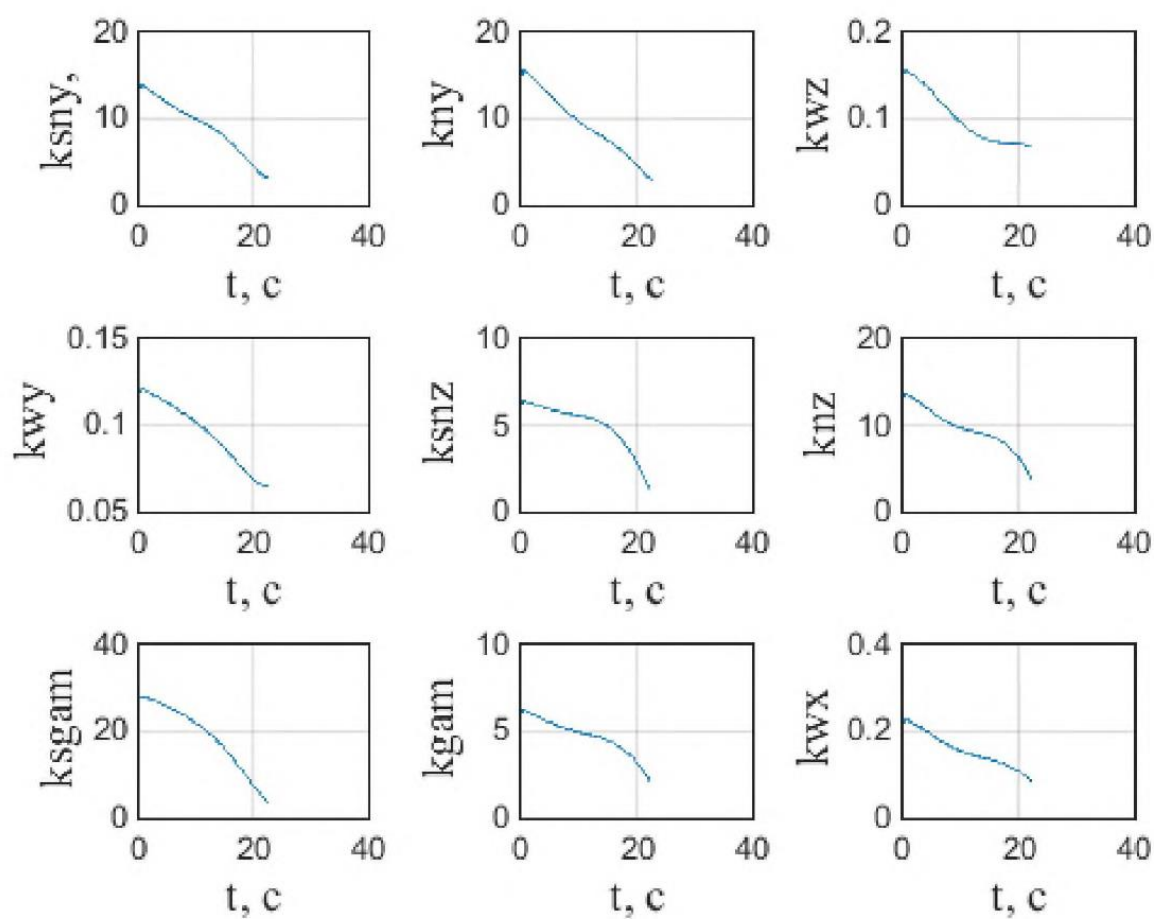


Рисунок 3.22 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

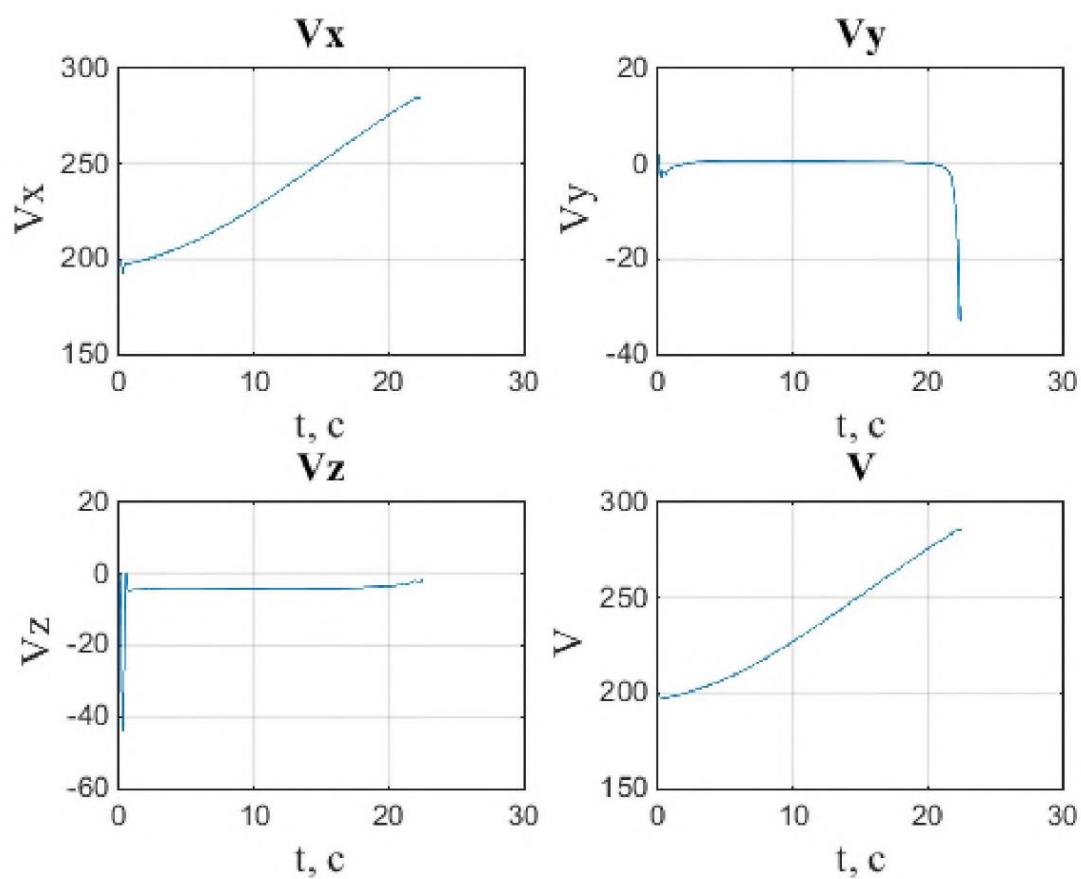


Рисунок 3.23 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

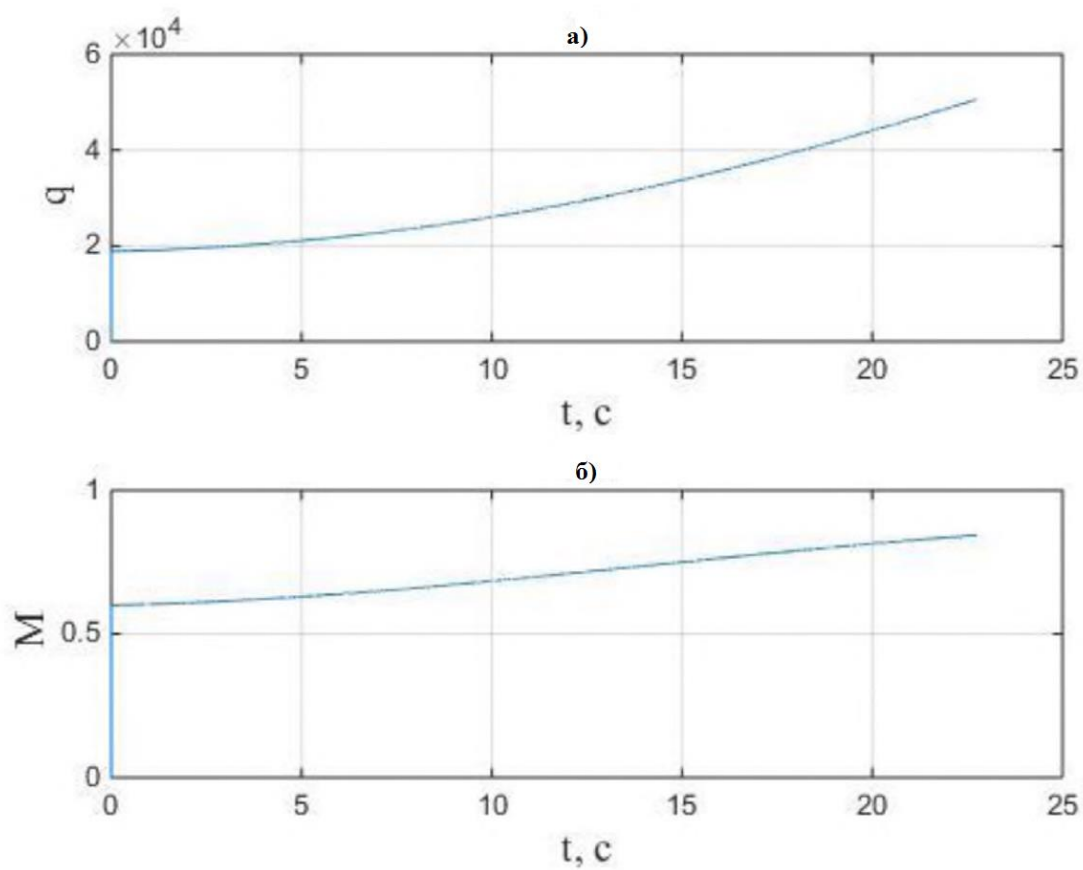


Рисунок 3.24 – Зміна швидкісного напорю (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=15; k_{y2}=6; k_{k2}=15$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,334 м; \Delta Y = -0,3751 м; \Delta Z = 0,1689 м.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -12,51^\circ; \Theta = -46,73^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 284,303 \frac{м}{с}; V_y = -30,135 \frac{м}{с}; V_z = -2,1488 \frac{м}{с}.$$

При використанні точного опису параметрів адаптації ССт покращилася якість стабілізації при наведенні БПЛА, що дозволило підвищити точність БПЛА при русі до цілі.

3.1.5 Варіант моделювання №4. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом

Точка старту має координати: $X(t_0)=0 м; Y(t_0)=2500 м, Z(t_0)=0 м$.

Координати цілі приймаються рівними: $X_{ц}=4500 м; Y_{ц}=0 м, Z_{ц}=500 м$.

Опис параметрів ССт задано наближеними емпіричними залежностями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі знаходження утопічної точки.

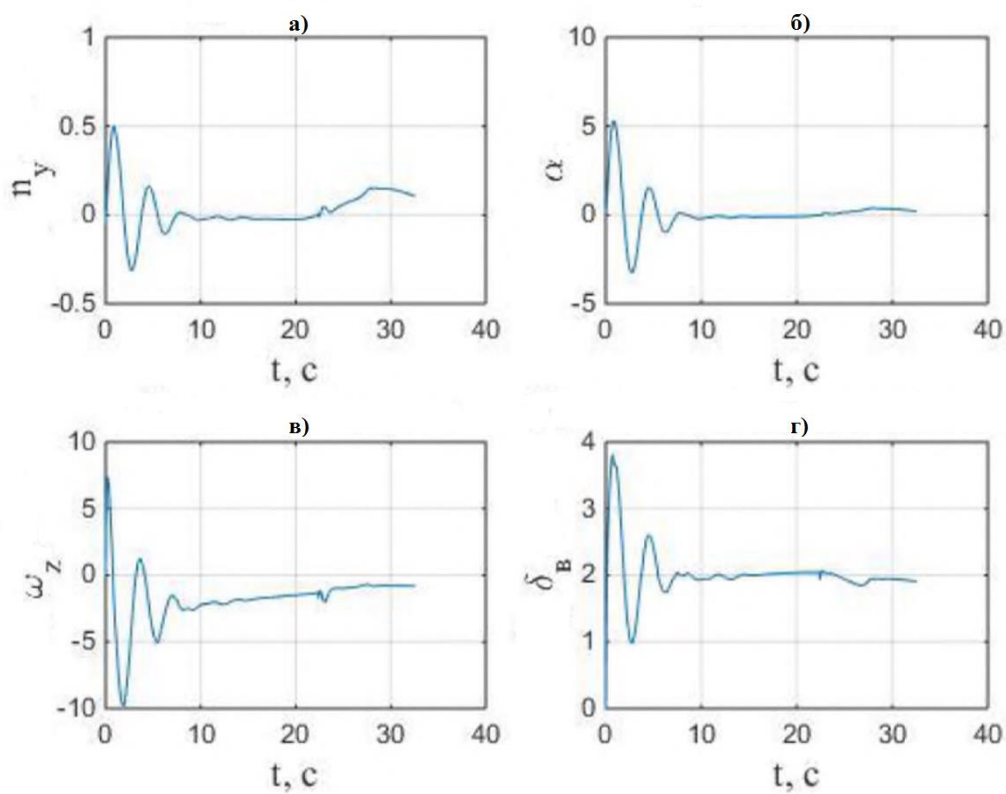


Рисунок 3.25 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

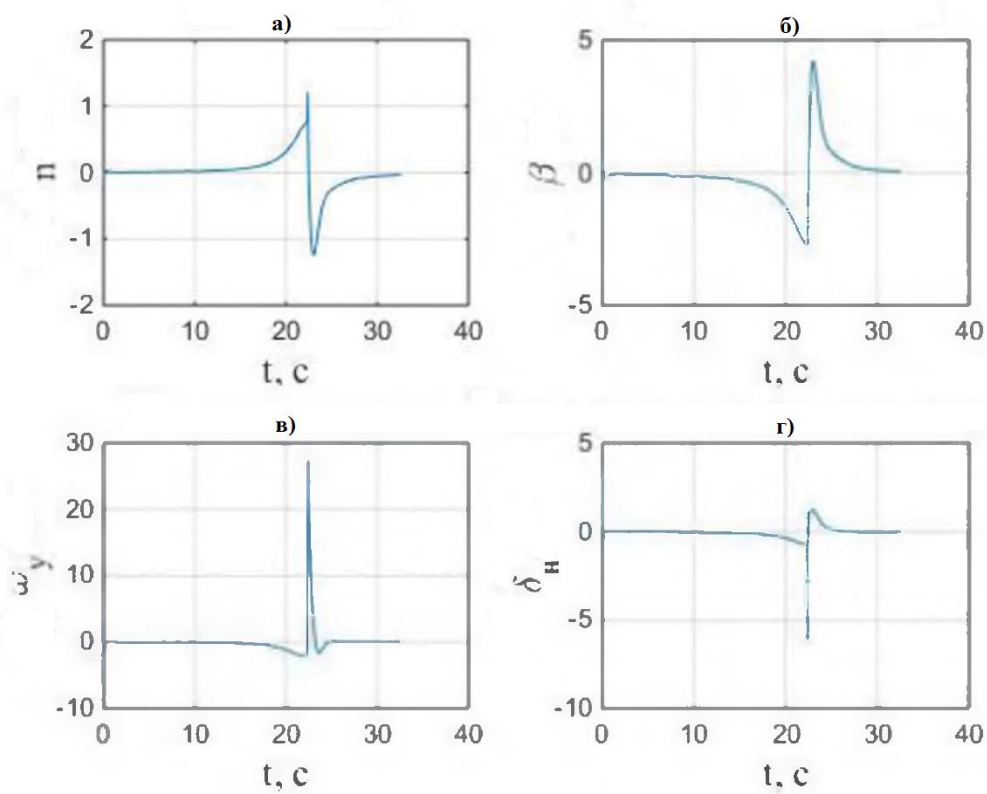


Рисунок 3.26 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

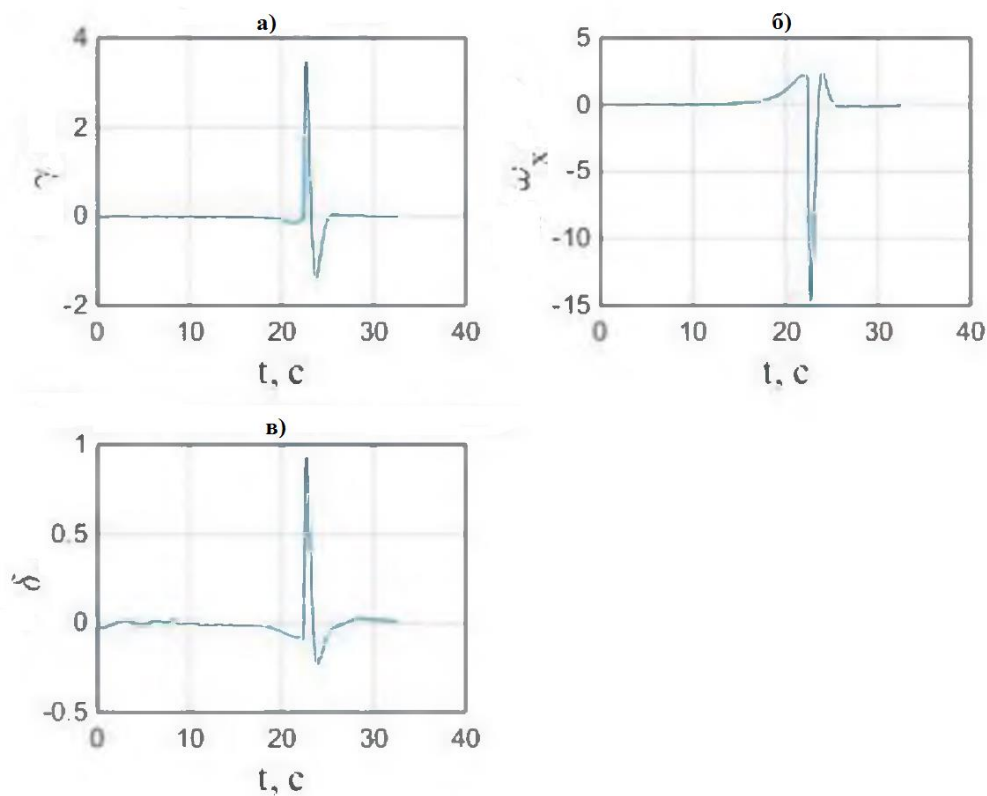


Рисунок 3.27 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

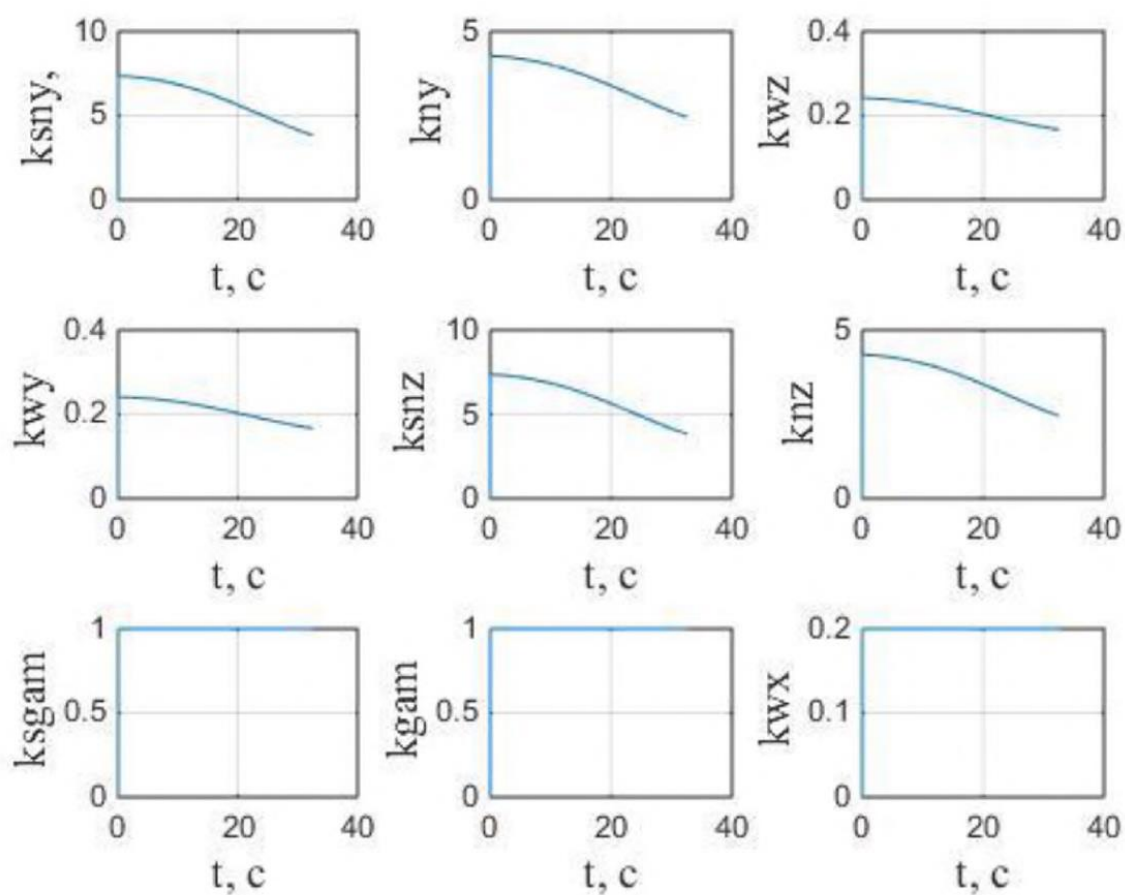


Рисунок 3.28 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

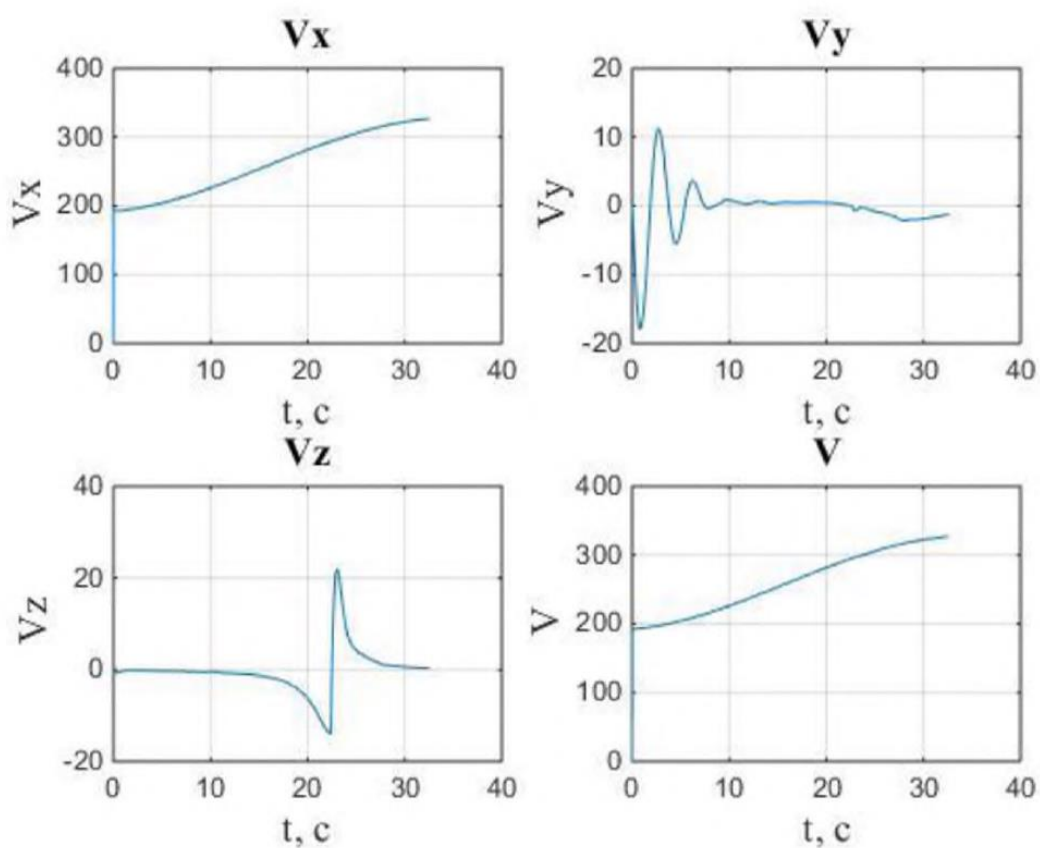


Рисунок 3.29 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

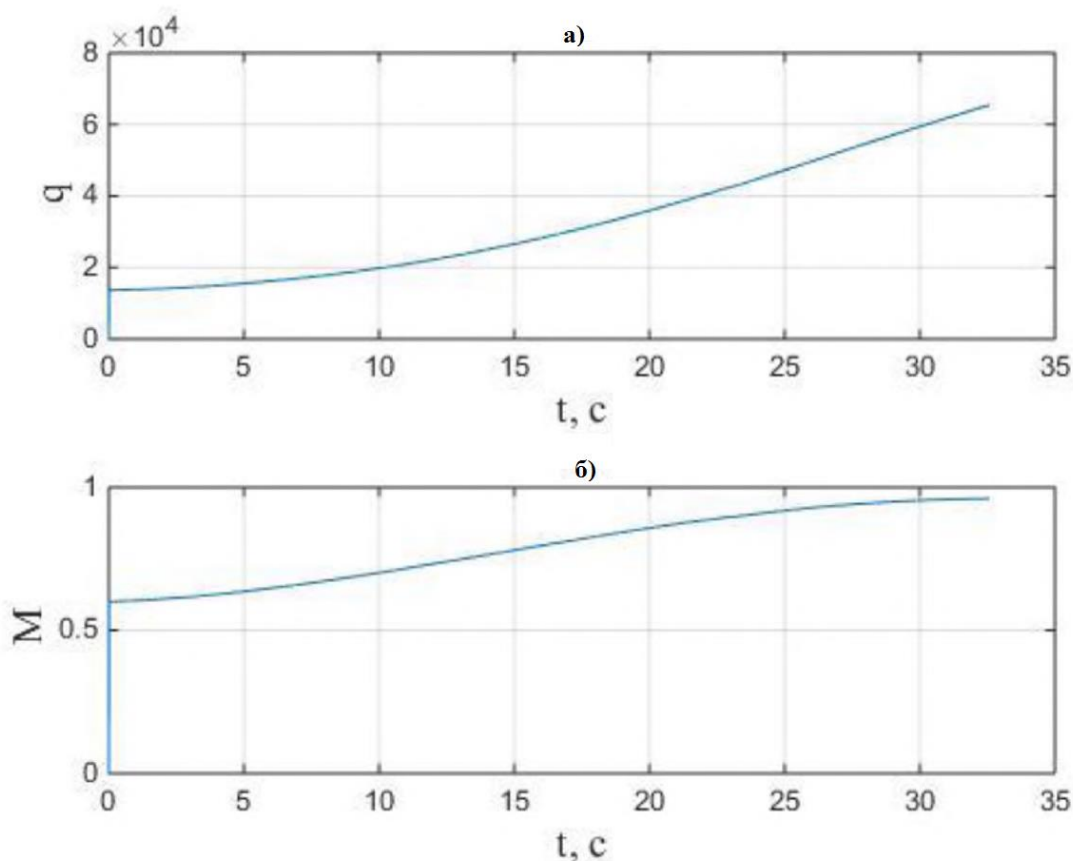


Рисунок 3.30 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1} = 7; k_{k1} = 10; k_{y2} = 8; k_{k2} = 20$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,19 \text{ м}; \Delta Y = -0,02371 \text{ м}; \Delta Z = 0,803 \text{ м}.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = 0,4^\circ; \Theta = -57,12^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 327,403 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_y = 2,52 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_z = 0,288 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В ході отримання значень параметрів на рівні системи стабілізації були досліджені 18 точок на робочій області. Результируючі поверхні, що характеризують залежність параметрів зворотного зв'язку ССт, були отримані в результаті інтерполяції отриманих значень на всю область, відповідну зоні застосовності МАС. Внаслідок цього можливе отримання ділянок на цих поверхнях, відповідних недостатньо хорошим результатам по стабілізації. Прояв даних незадовільних результатів щодо стабілізації спостерігаються в варіанті моделювання 4. З метою підвищення якості стабілізації вводяться обмеження на значення параметрів ССт:

$$k_{sny} \geq 0,2; k_{ny} \geq 0,2; k_{\omega z} \geq 0,02;$$

$$k_{snz} \geq 0,2; k_{nz} \geq 0,2; k_{\omega y} \geq 0,02;$$

$$k_{s\gamma} \geq 0,2; k_{\gamma} \geq 0,2; k_{\omega x} \geq 0,02.$$

Дані обмеження відповідають деяким співвідношенням між швидкістю польоту і висотою, на якій знаходиться МАС. Тому в якості додаткової координації здійснюється оцінка отриманої траєкторії, на ній знаходиться точка, яка потрапляє в обмеження, і далі здійснюється наведення спочатку в околицях точки, що не відповідає необхідній якості стабілізації, а вже після досягнення проміжної точки здійснюється наведення на ціль. Даний принцип здійснення траєкторної безпеки дозволяє істотно поліпшити якість стабілізації шляхом посилення впливу координації верхнього рівня на нижній.

3.1.6 Варіант моделювання №5. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт

Точка старту має координати: $X(t_0)=0\text{ м}; Y(t_0)=5000\text{ м}, Z(t_0)=0\text{ м}.$

Координати цілі приймаються рівними: $X_{ц}=4500\text{ м}; Y_{ц}=0\text{ м}, Z_{ц}=500\text{ м}.$

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі знаходження утопічної точки.

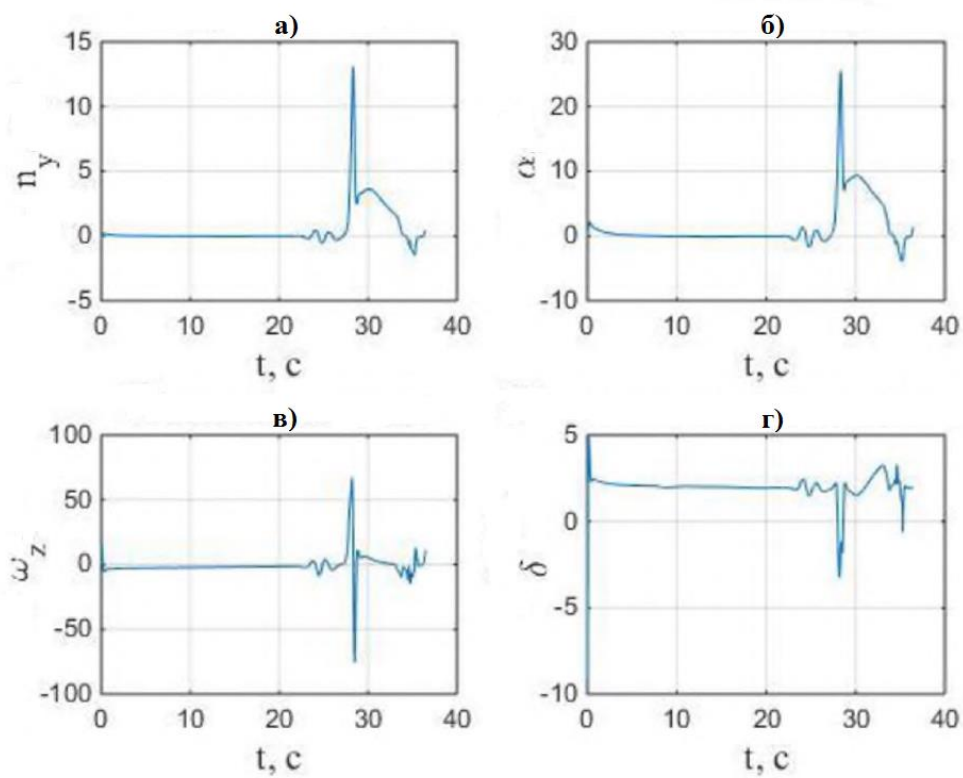


Рисунок 3.31 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

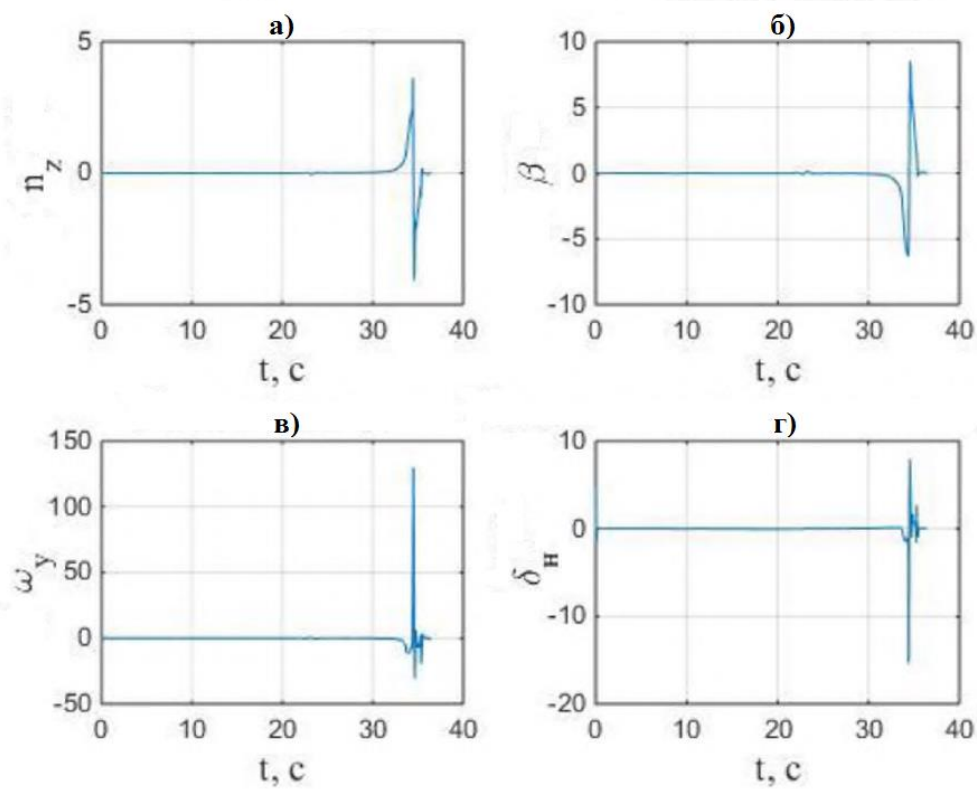


Рисунок 3.32 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

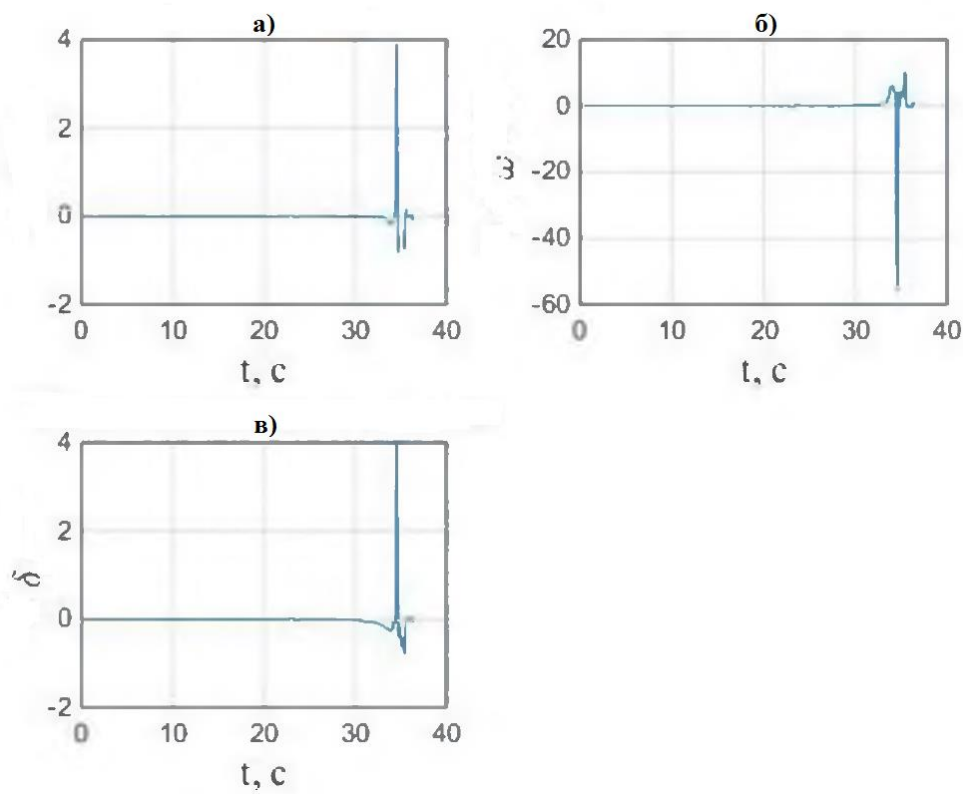


Рисунок 3.33 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

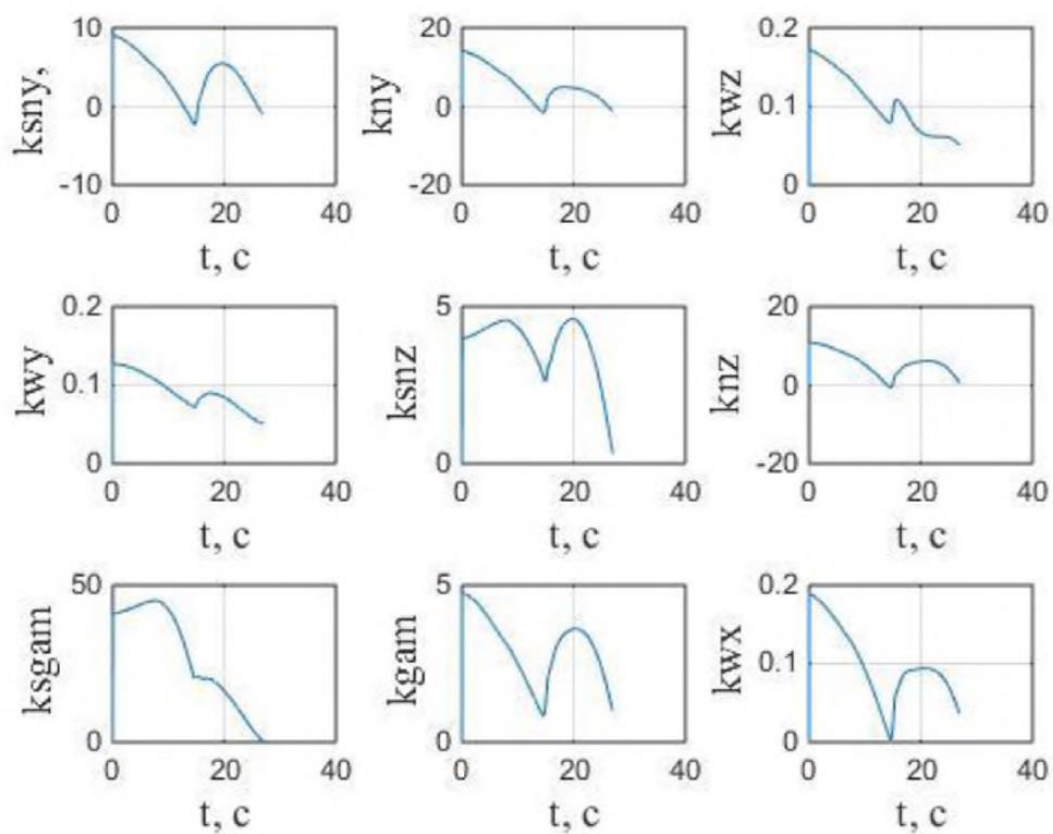


Рисунок 3.34 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

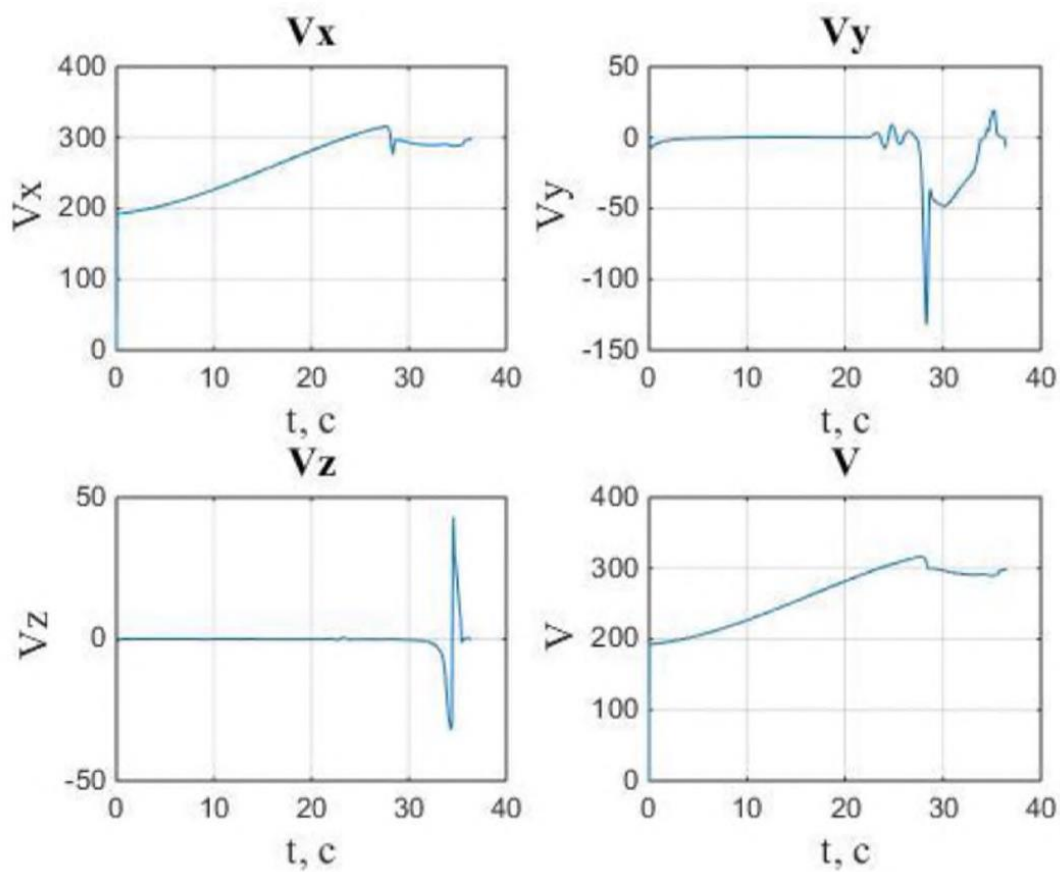


Рисунок 3.35 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

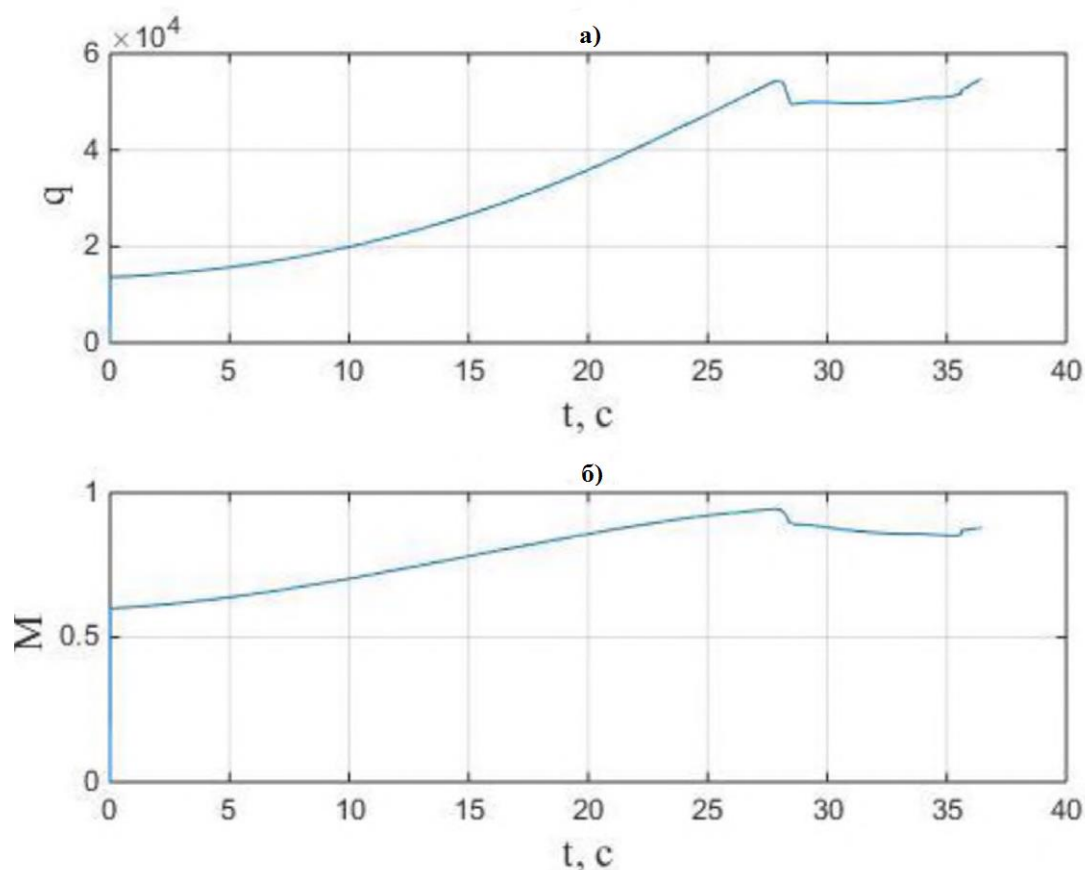


Рисунок 3.36 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=7; k_{k1}=10; k_{y2}=8; k_{k2}=20$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,437 \text{ м}; \Delta Y = -0,3732 \text{ м}; \Delta Z = 0,258 \text{ м}.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -7,39^\circ$; $\Theta = -57,08^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 327,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_y = 2,53 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_z = 0,289 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3.1.7 Варіант моделювання №6. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень

Точка старту має координати: $X(t_0)=0\text{ м}; Y(t_0)=5000\text{ м}, Z(t_0)=0\text{ м}$.

Координати цілі приймаються рівними: $X_{Ц}=4500\text{ м}; Y_{Ц}=0\text{ м}, Z_{Ц}=500\text{ м}$.

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

Для даного варіанту моделювання використовується принцип отримання Парето-оптимального рішення на основі застосування рівноважно-арбітражного алгоритму.

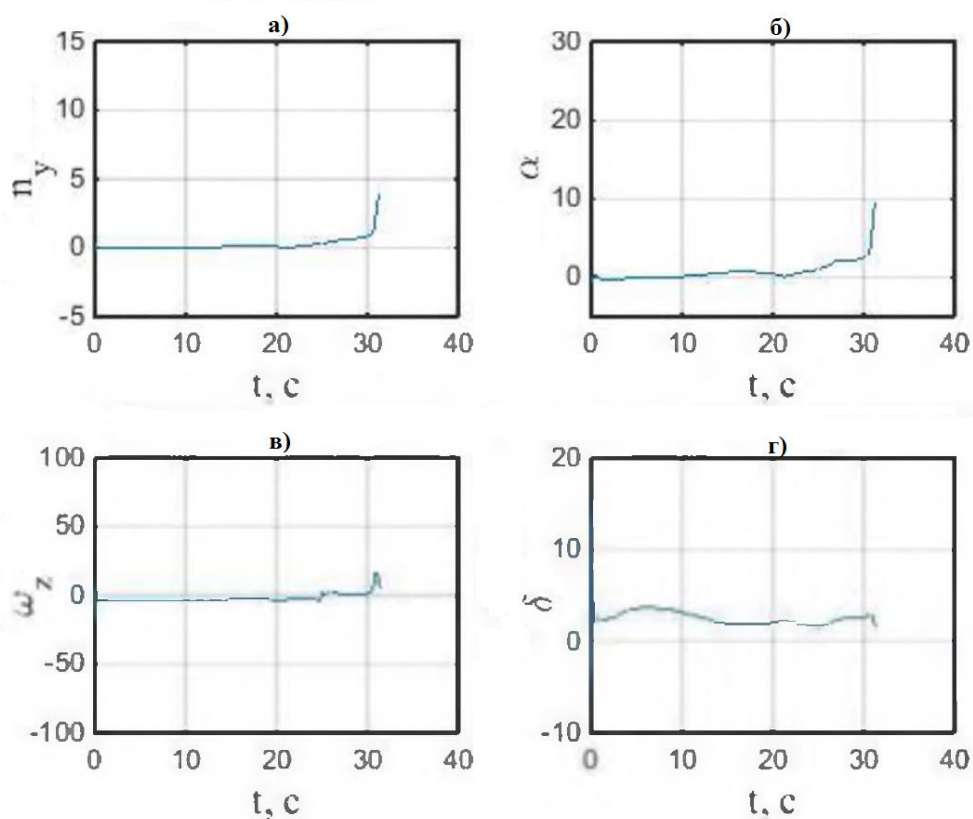


Рисунок 3.37 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

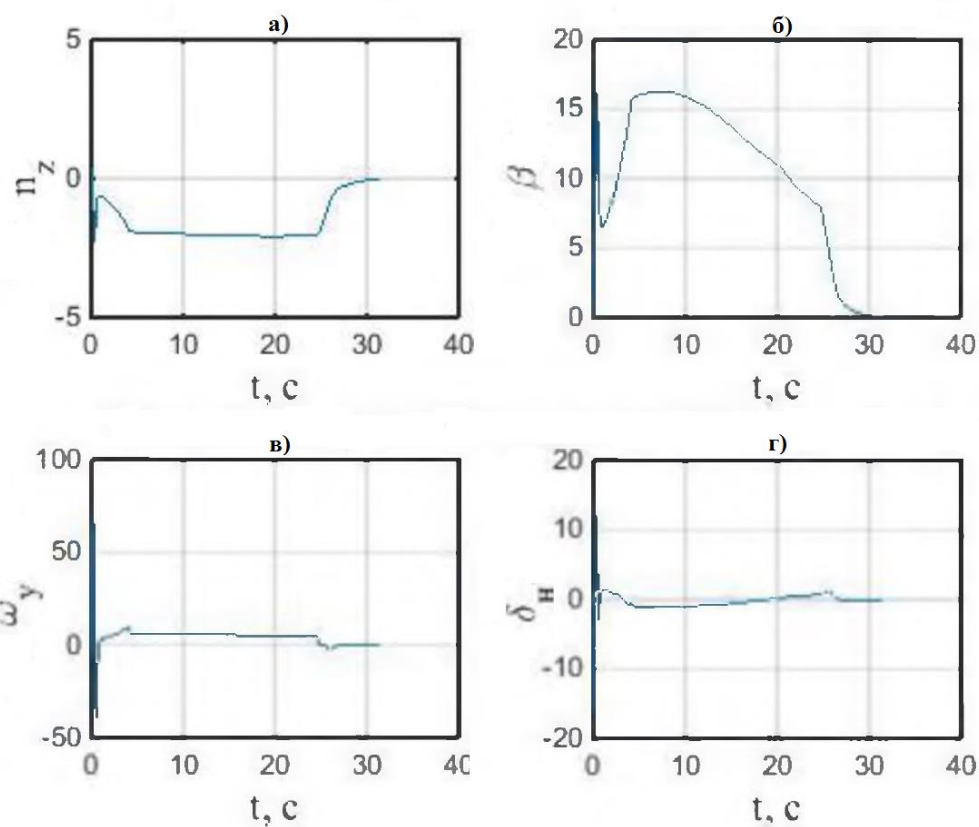


Рисунок 3.38 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

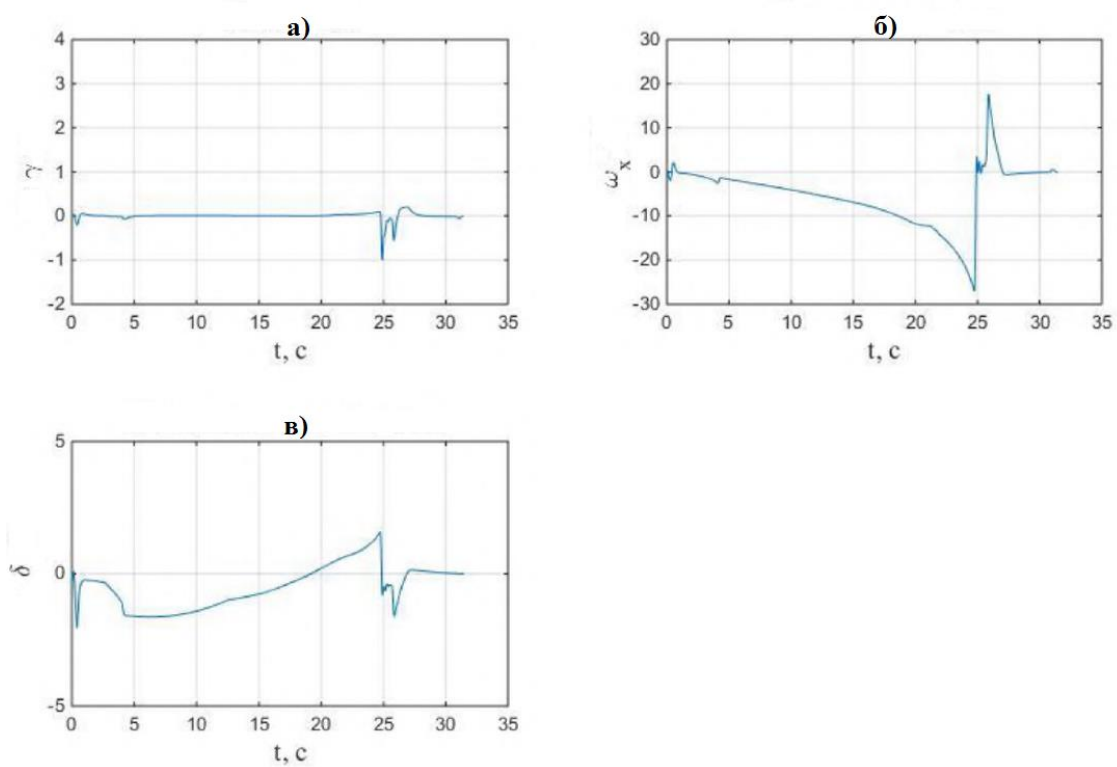


Рисунок 3.39 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

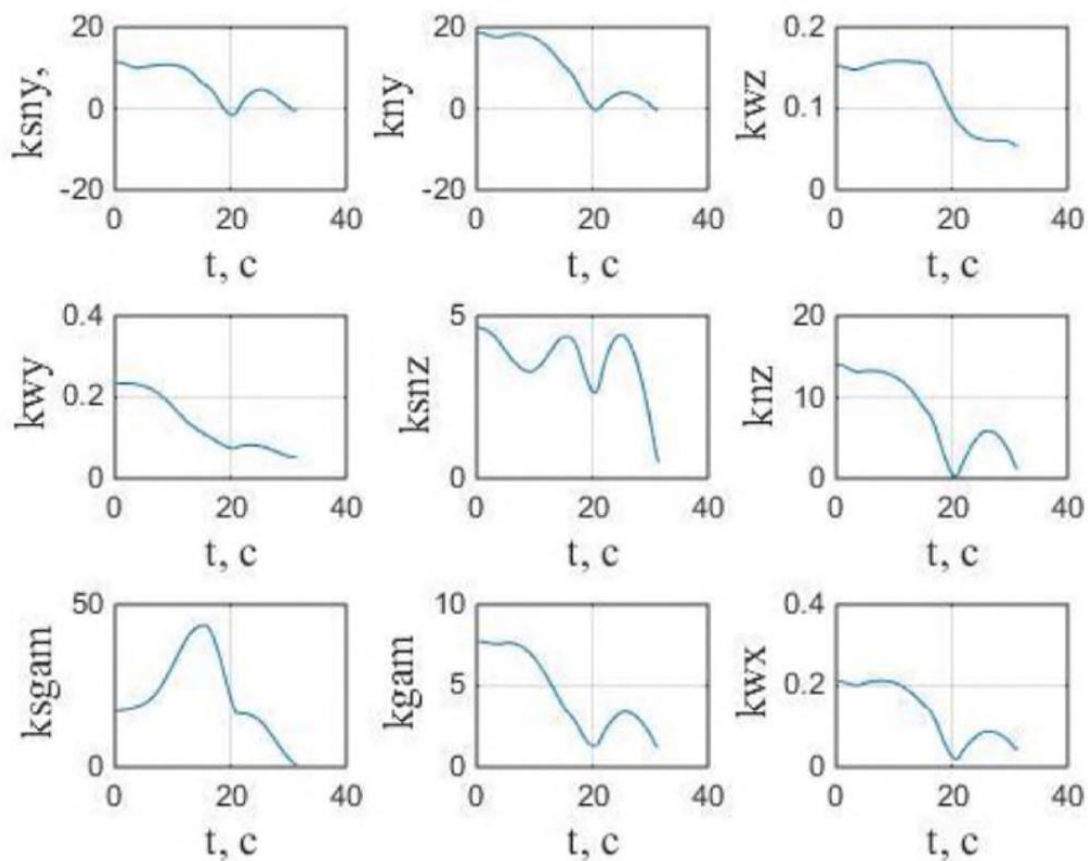


Рисунок 3.40 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

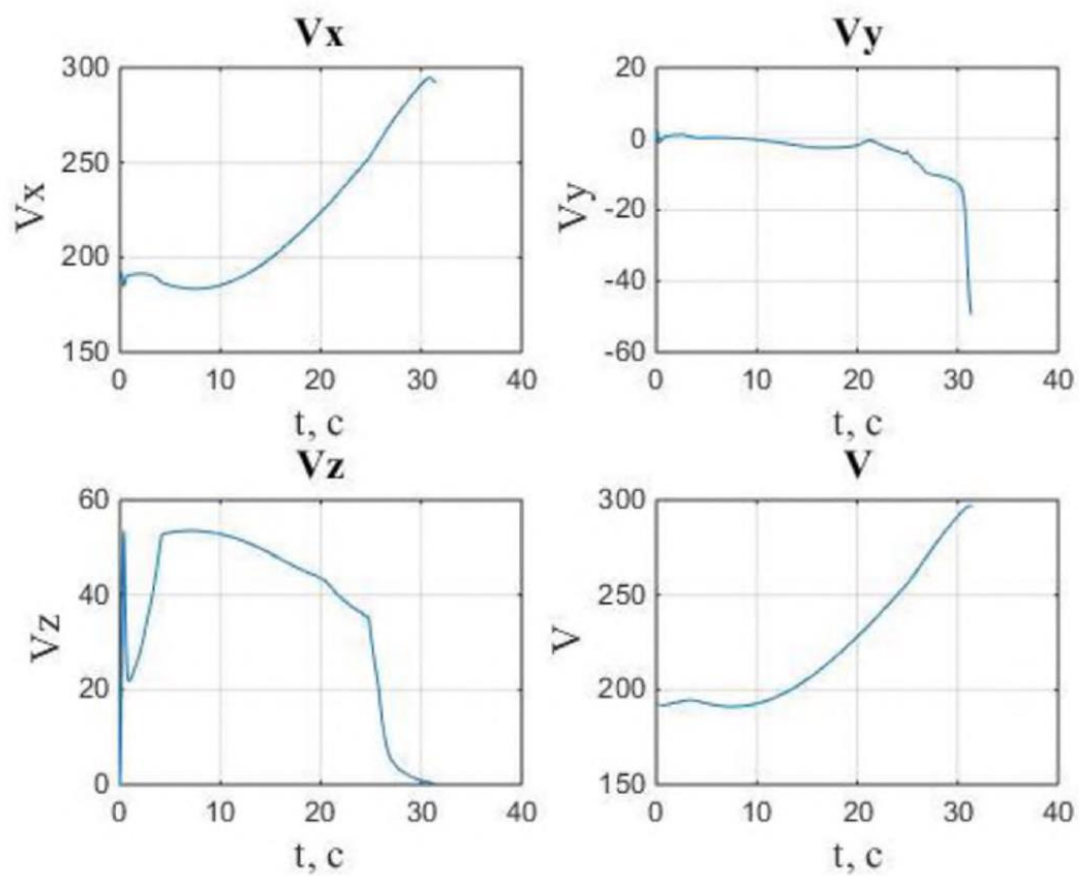


Рисунок 3.41 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

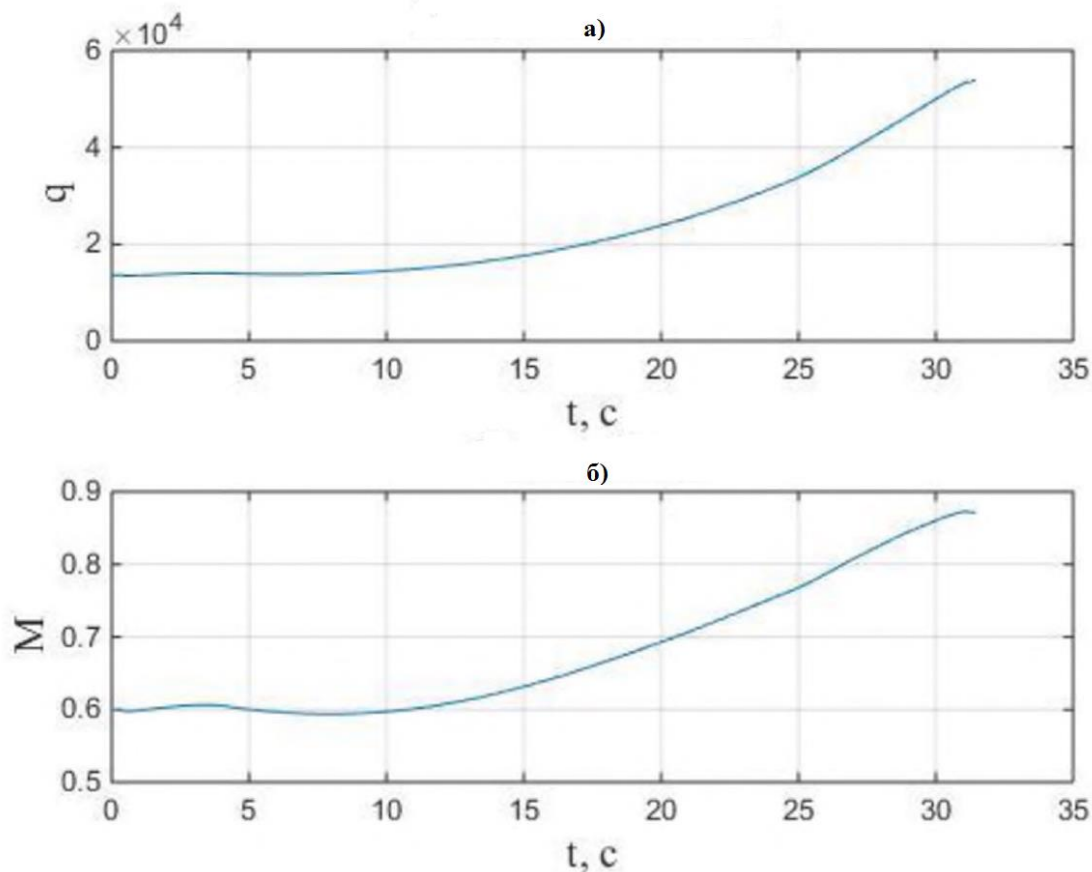


Рисунок 3.42 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=6; k_{k1}=20; k_{y2}=6; k_{k2}=30$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,2193 м; \Delta Y = -0,2007 м; \Delta Z = 0,241 м.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -9,4^\circ$; $\Theta = -63,04^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 305,699 \frac{м}{с}; V_y = 23,593 \frac{м}{с}; V_z = 14,276 \frac{м}{с}.$$

Аналіз отриманих результатів:

- 1) Аналізуючи варіанти 1 і 2, можна зробити висновок, що при використанні наближеного опису коефіцієнтів стабілізації для даних початкових координат і термінальних координат, знайдені в результаті застосування двох методик отримання Парето-оптимального рішення, оптимальні параметри на рівні наведення збігаються.
- 2) Аналізуючи варіант 1 і 3, можна зробити висновок, що точність наведення в разі використання точного опису системи стабілізації вище, ніж при використанні наближеного опису. Якість стабілізації в варіанті 3 значно вище, амплітуди зміни компонент вектору стану менше, а характеристики є менш збуреними.
- 3) Аналізуючи варіант 5, можна зробити висновок, що при використанні точного опису ССт виникають високочастотні коливання в ті моменти, коли МАС потрапляє в умови польоту, для яких інтерполяція параметрів ССт дає непридатні результати.
- 4) Аналізуючи варіант 6, можна зробити висновок, що додаткова корекція закону наведення з метою здійснення траєкторної безпеки приносить позитивні результати в порівнянні з варіантом 5.

3.1.8 Варіант моделювання №7. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень

Точка старту має координати: $X(t_0) = 0\text{ м}; Y(t_0) = 2500\text{ м}, Z(t_0) = 0\text{ м}.$

Координати цілі приймаються рівними: $X_{ц} = 4500\text{ м}; Y_{ц} = 0\text{ м}, Z_{ц} = 250\text{ м}.$

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

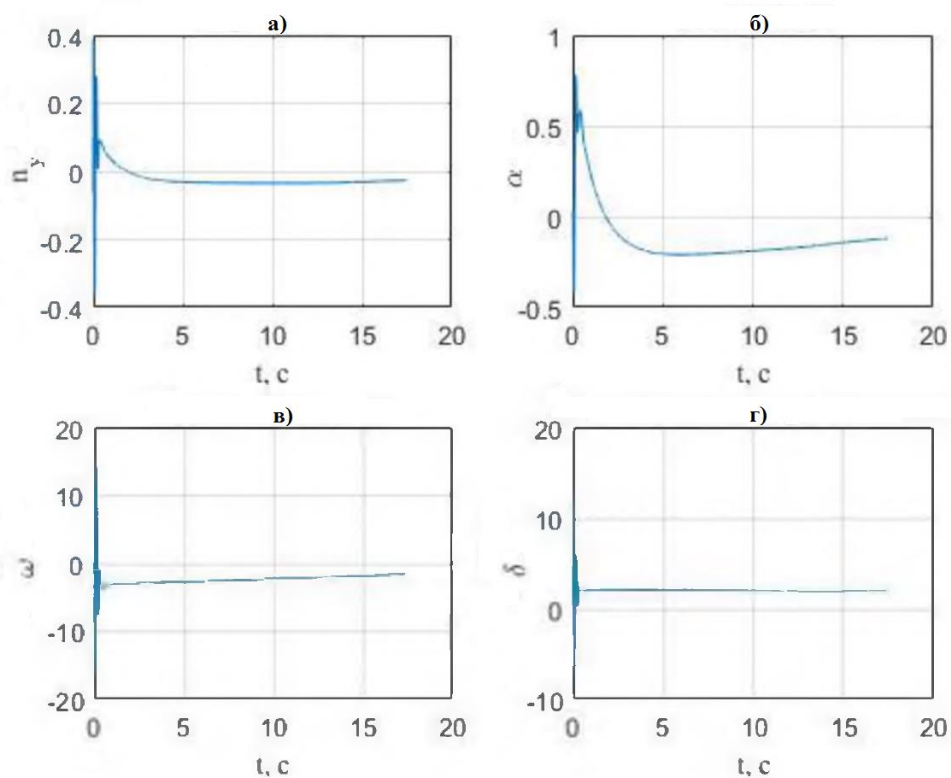


Рисунок 3.43 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

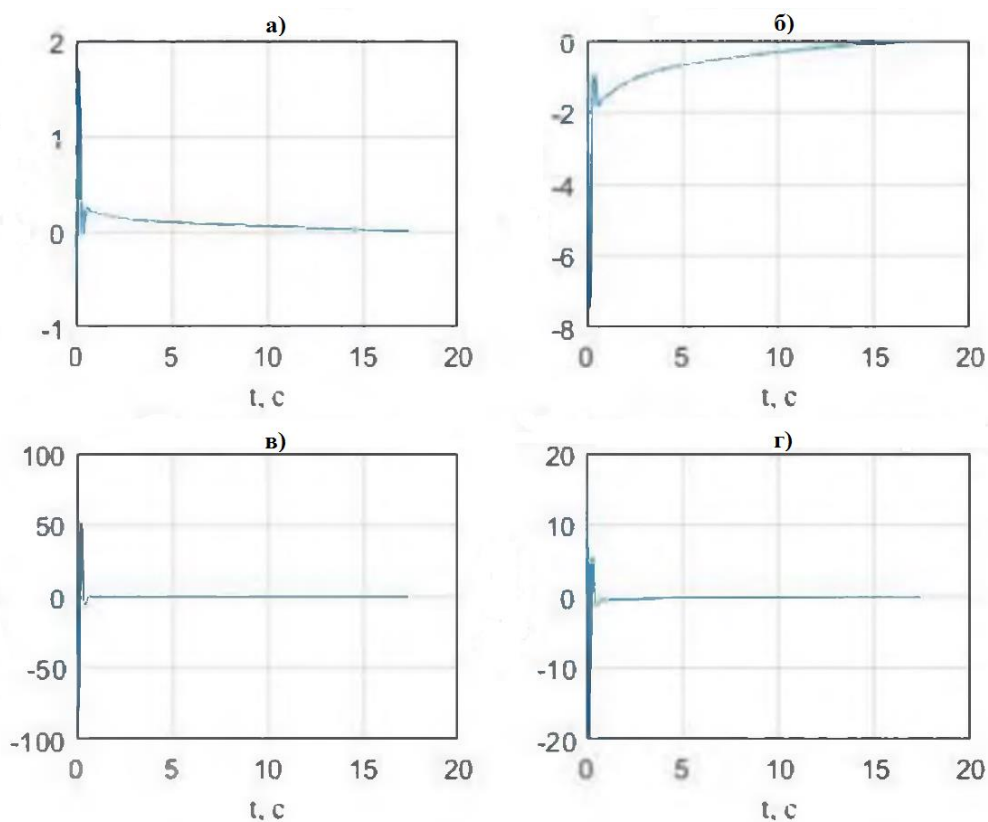


Рисунок 3.44 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма направлення)

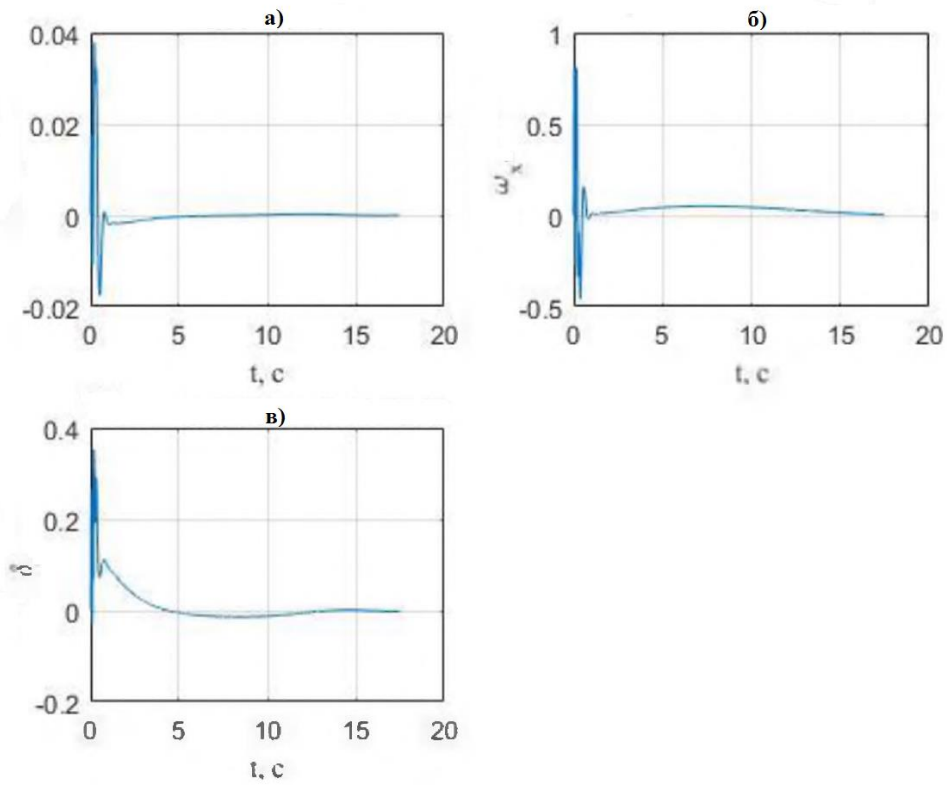


Рисунок 3.45 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

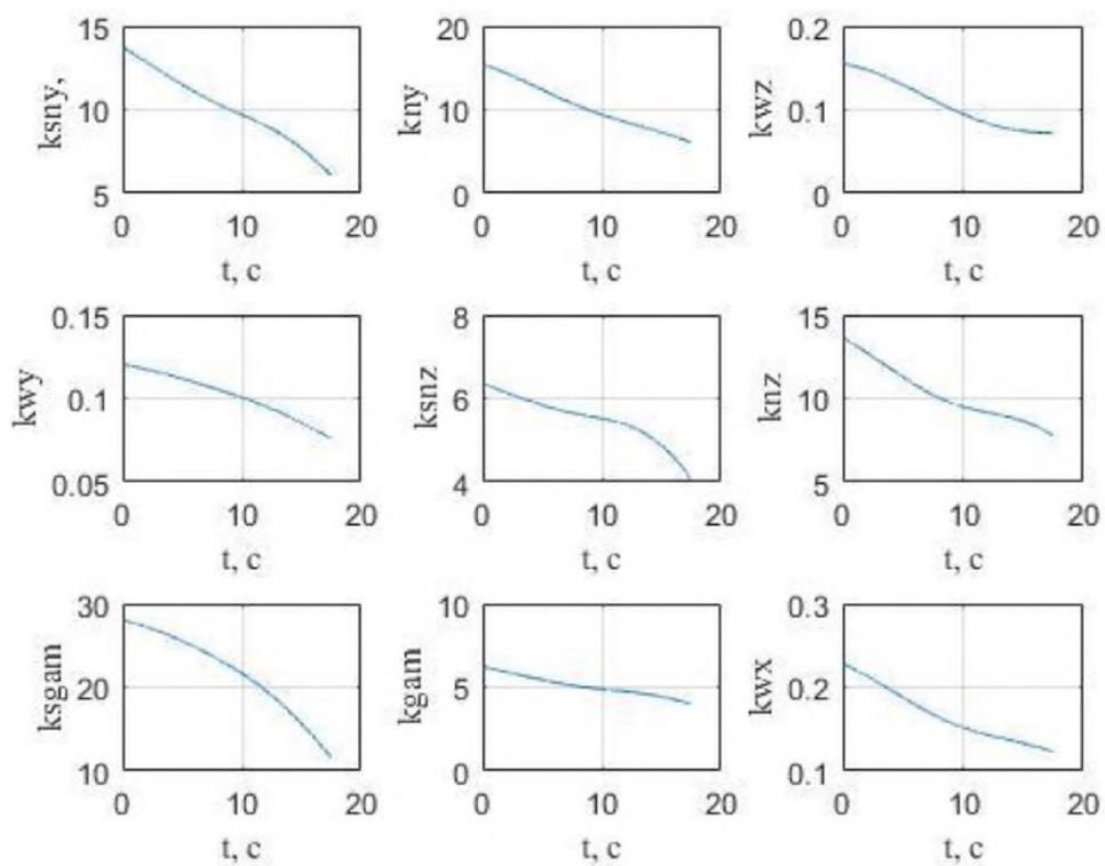


Рисунок 3.46 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

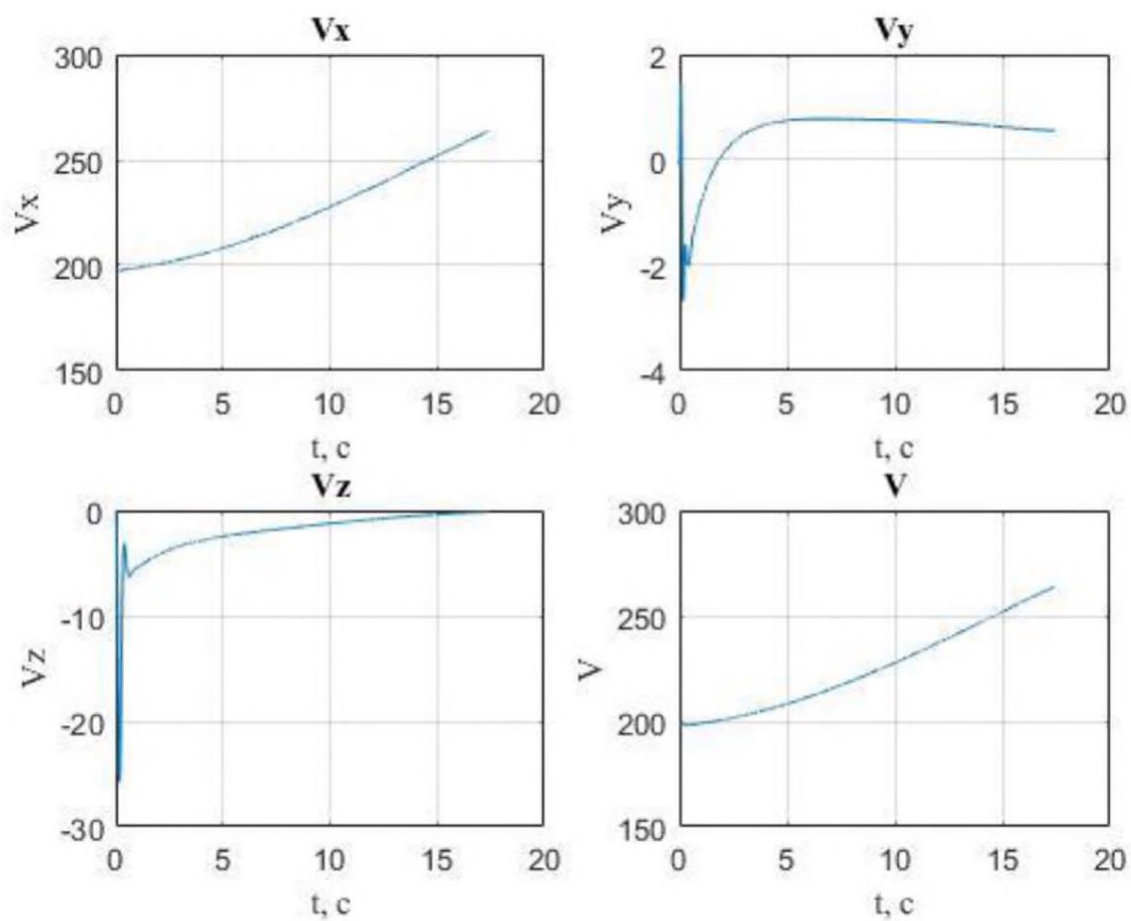


Рисунок 3.47 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

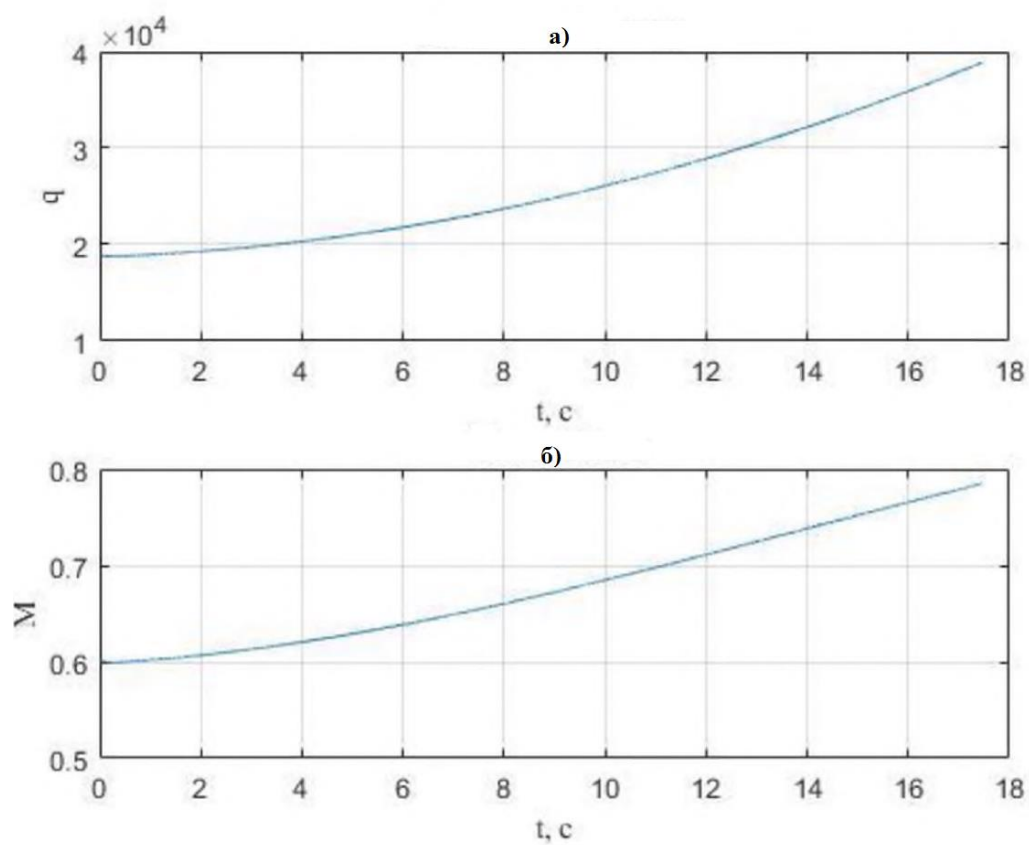


Рисунок 3.48 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=25; k_{y2}=9; k_{k2}=25$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,232 \text{ м}; \Delta Y = -0,266 \text{ м}; \Delta Z = 0,698 \text{ м}.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = -4,086^\circ; \Theta = -41,03^\circ$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 264,08 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_y = 57,2785 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_z = 28,175 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3.1.9 Варіант моделювання №8. Зміна крайових умов у порівнянні з базовим варіантом. Використання точного опису параметрів ССт з урахуванням обмежень

Точка старту має координати: $X(t_0)=0 \text{ м}; Y(t_0)=2500 \text{ м}, Z(t_0)=0 \text{ м}.$

Координати цілі приймаються рівними: $X_{ц}=4500 \text{ м}; Y_{ц}=0 \text{ м}, Z_{ц}=0 \text{ м}.$

Опис параметрів ССт задано багатокритеріальними інтерполяційними поверхнями з адаптацією за швидкісним напором.

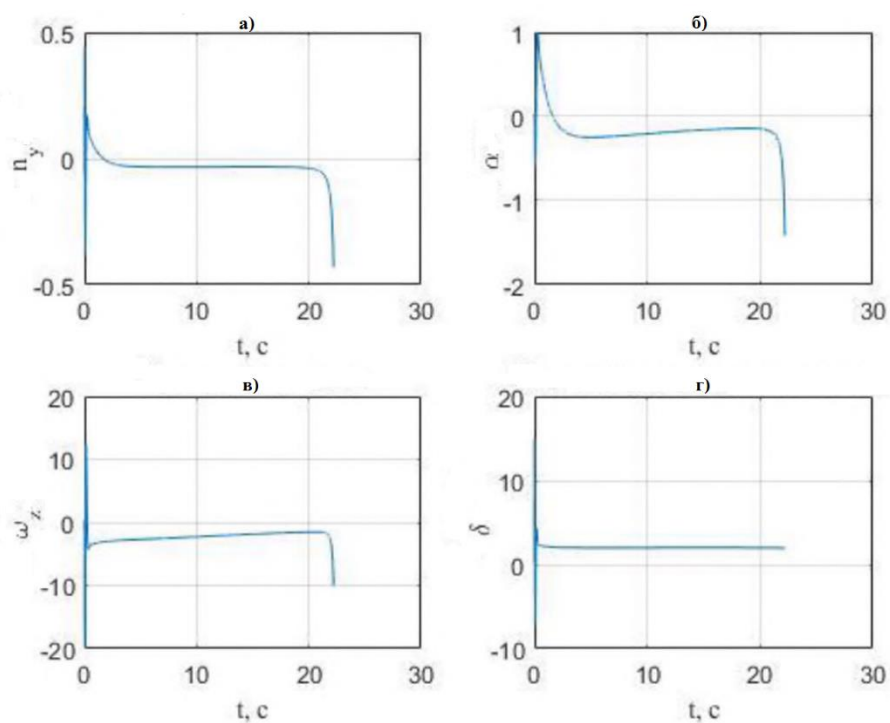


Рисунок 3.49 – Параметри поздовжнього каналу (а – перевантаження; б – кут; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма висоти)

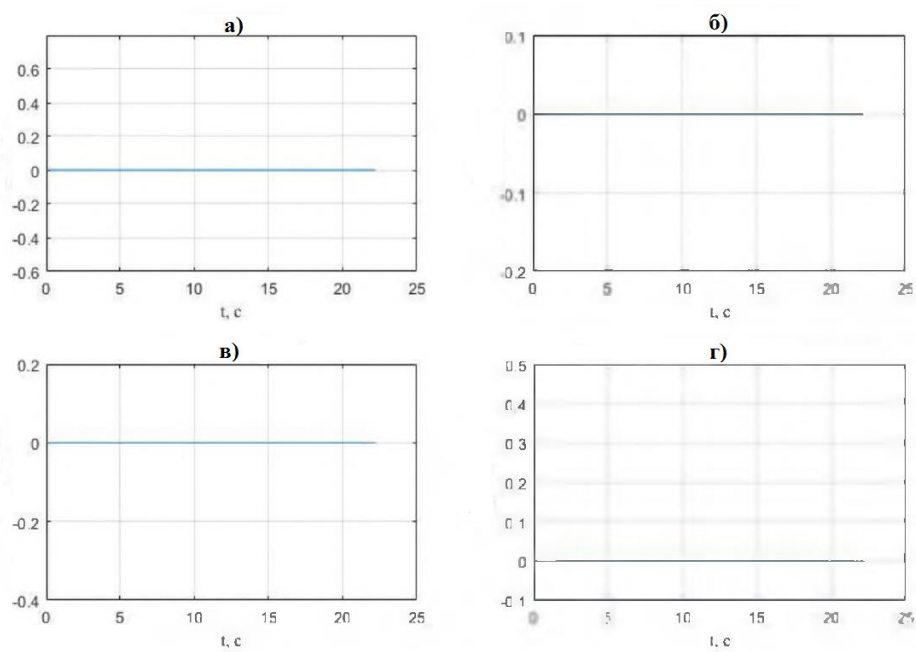


Рисунок 3.50 – Параметри бокового каналу (а – перевантаження; б – кут ковзання; в – кутова швидкість; г – кут відхилення керма напрямлення)

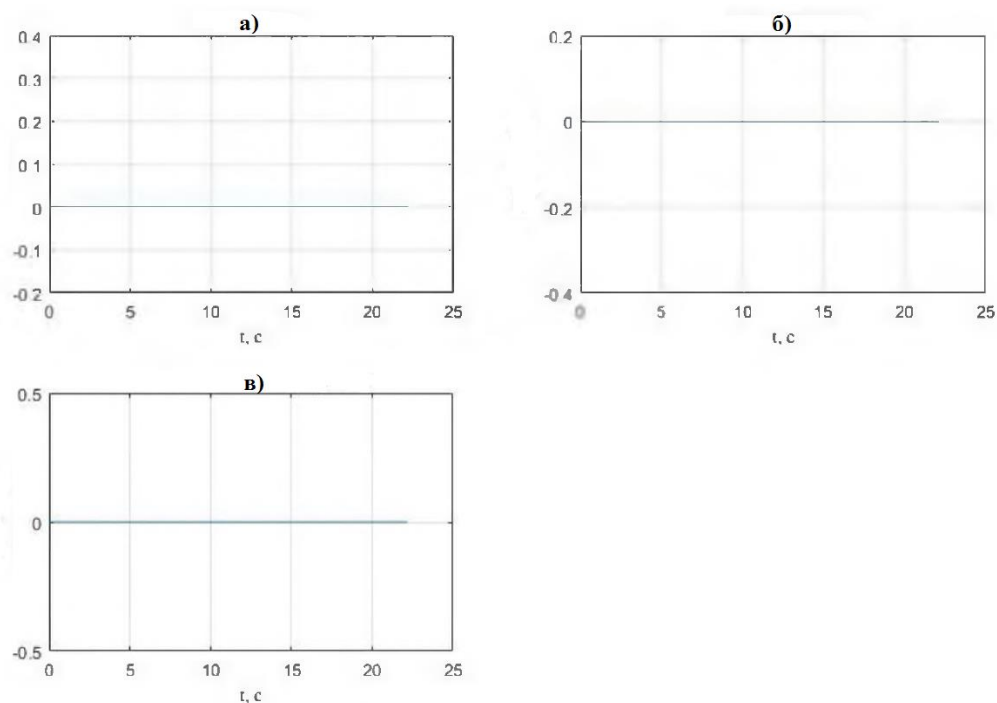


Рисунок 3.51 – Параметри каналу крену (а – кут крену; б – кутова швидкість; в – кут відхилення елеронів)

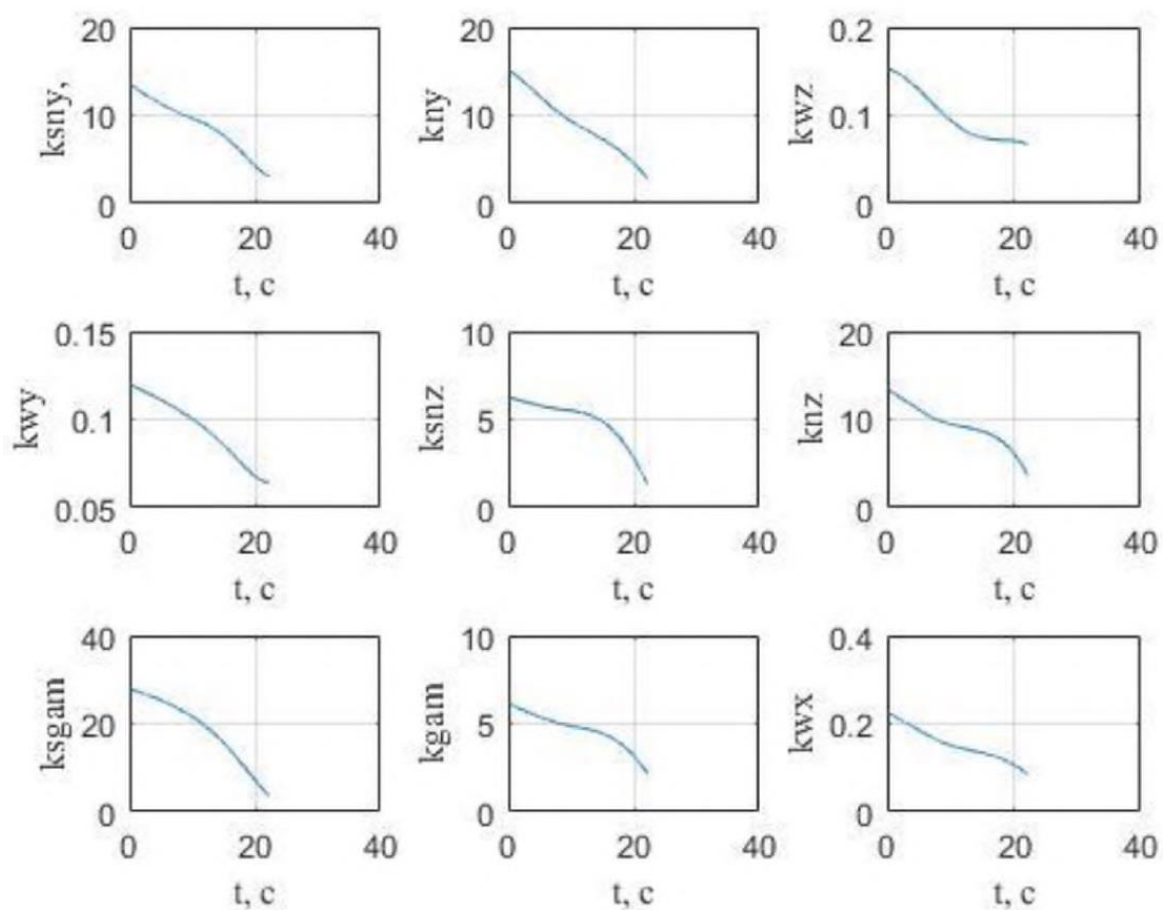


Рисунок 3.52 – Закони зміни коефіцієнтів адаптації ССт

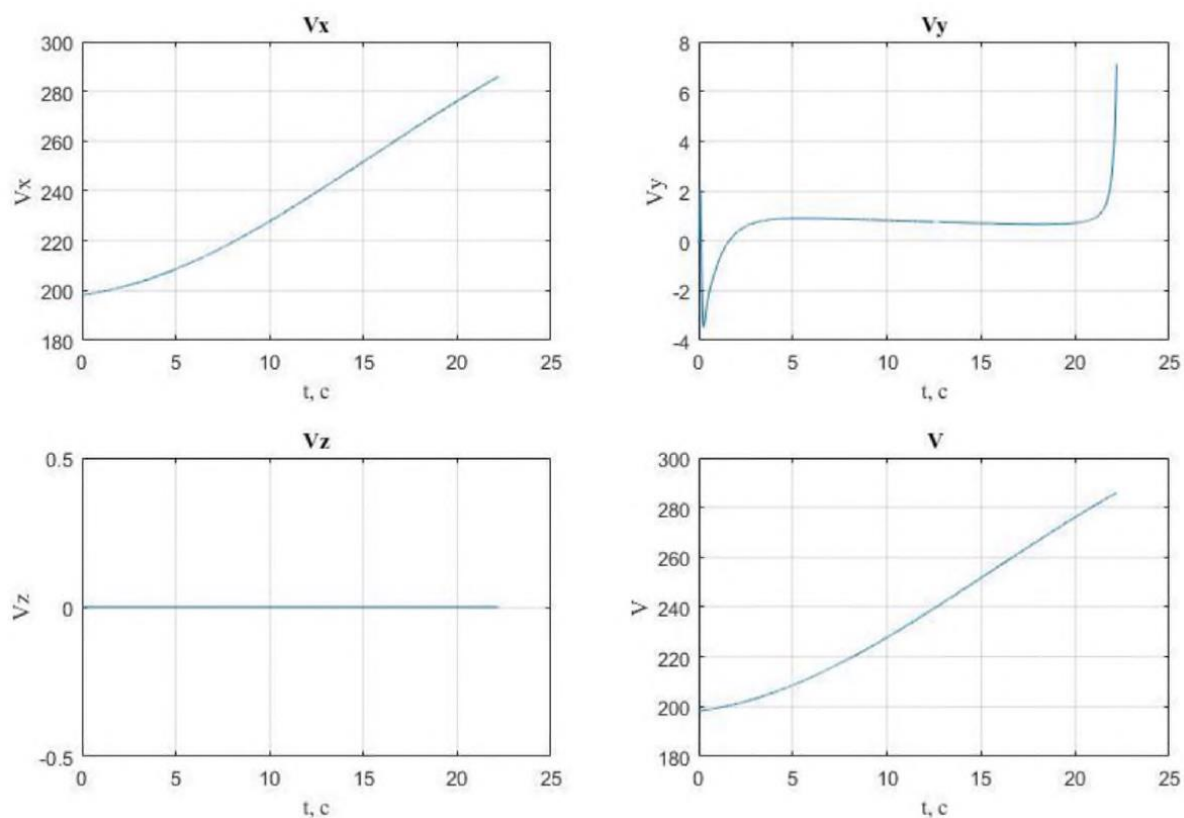


Рисунок 3.53 – Часові залежності швидкості в процесі наведення

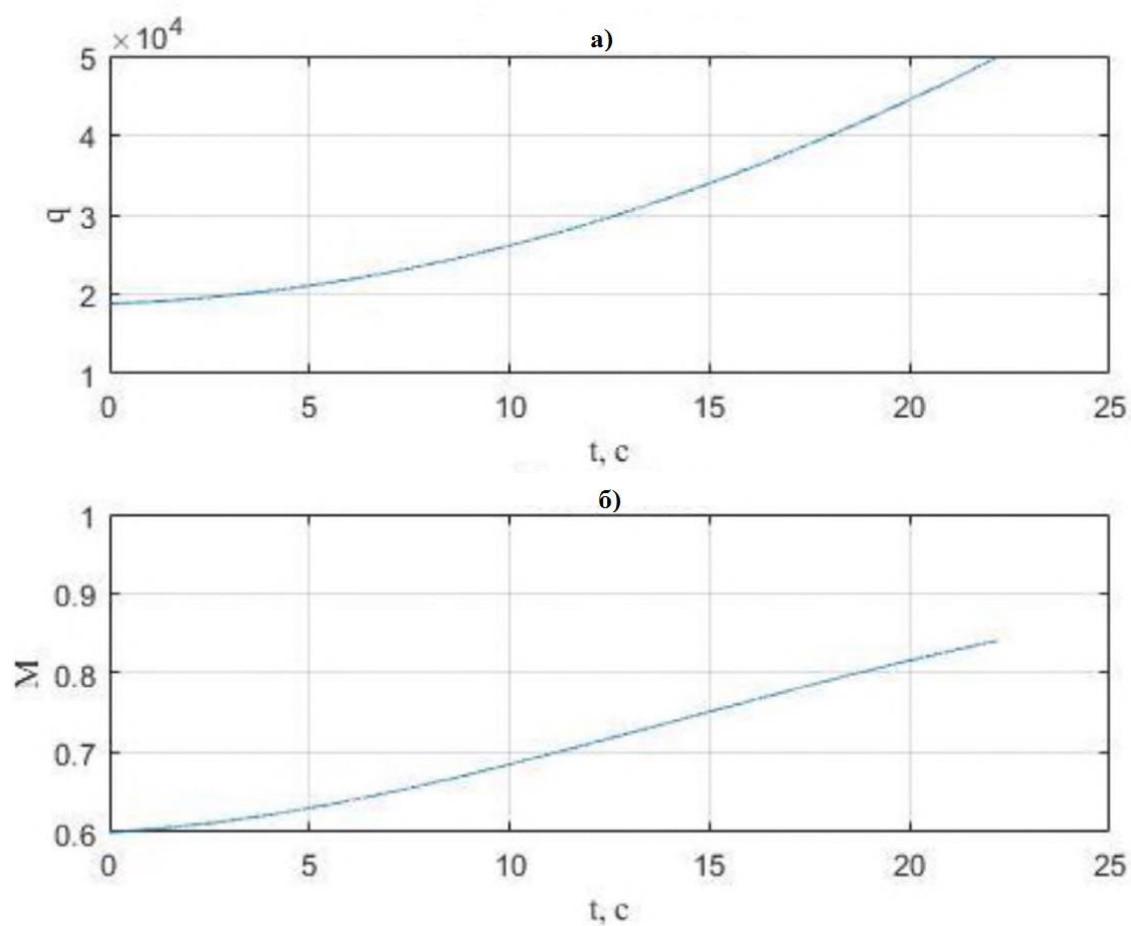


Рисунок 3.54 – Зміна швидкісного напору (а) і числа Маха (б)

Парето-оптимальні значення параметрів на рівні наведення, отримані в результаті застосування алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК, а також значення компонент вектору стану, що входять в опис критеріїв ефективності на рівні наведення, в кінцевий момент часу рівні:

Значення параметрів на рівні наведення: $k_{y1}=3; k_{k1}=15; k_{y2}=6; k_{k2}=5$.

Значення векторного промаху:

$$\Delta X = 0,371 м; \Delta Y = -0,385 м; \Delta Z = 0 м.$$

Значення кутів, які характеризують вимогу за якістю наведення, в кінцевий момент часу: $\Psi = 0^0; \Theta = -48,45^0$.

Значення швидкостей в кінцевий момент часу:

$$V_x = 285,946 \frac{м}{с}; V_y = 7,38 \frac{м}{с}; V_z = 0 \frac{м}{с}.$$

За результатами комп'ютерного моделювання процесу наведення БПЛА на малорухливу ціль підтверджується доцільність застосування запропонованого алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі координованих стабільно-ефективних компромісів.

Висновки по третьому розділу

Дослідження, що проводяться в рамках даної роботи проводилися при різних варіантах задання оптимальних адаптивних залежностей параметрів ССт від швидкісного напору.

Результати моделювання підтверджують працездатність методу дослідження. Ефективність його застосування особливо наочно проявляється при необхідності додаткової координації ССт з метою підвищення її ефективності.

За результатами комп'ютерного моделювання процесу наведення БПЛА на малорухливу ціль, підтверджується доцільність застосування запропонованого алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі КОСТЕК.

На підставі результатів, отриманих в роботі і на підставі багатофакторного аналізу, результати якого наведені в цьому розділі можна зробити наступні висновки:

1. Без балансування каналів в дворівневій системі «наведення- стабілізації» і без забезпечення координації рівнів, якість системи стабілізації значно поступається варіанту, коли застосовувався алгоритм отримання оптимальної дворівневої системи «наведення-стабілізації» МАС на основі КОСТЕК в варіанті 3. І якість наведення відповідно до введених вимог також поступається.
2. При використанні оптимального опису параметрів адаптації ССт покращилася якість стабілізації при наведенні БПЛА, що дозволило підвищити точність БПЛА при заходженні на цільову платформу.
3. Різні способи знаходження оптимального рішення дають рівнозначні результати за якістю, точністю і швидкістю для випадку використання наближеного опису параметрів адаптації ССт.
4. В ході отримання значень параметрів на рівні системи стабілізації були досліджені 18 точок на робочій області. Результируючі поверхні, що характеризують залежність параметрів зворотного зв'язку ССт, були отримані в результаті інтерполяції отриманих значень на всю область, відповідну зоні застосовності МАС. Внаслідок цього можливе отримання ділянок на цих поверхнях, відповідних недостатньо хорошим результатам по стабілізації. З метою підвищення якості стабілізації вводяться обмеження на значення параметрів ССт. Дані обмеження відповідають деяким співвідношенням між швидкістю польоту і висотою, на якій знаходиться МАС. Тому в якості додаткової координації здійснюється оцінка отриманої траєкторії, на ній знаходиться точка, яка потрапляє в обмеження, і далі здійснюється наведення спочатку в околицях точки, що не відповідає необхідній якості стабілізації, а вже після досягнення проміжної точки здійснюється наведення на ціль. Даний принцип здійснення траєкторної безпеки дозволяє істотно поліпшити якість стабілізації шляхом посилення впливу координації верхнього рівня на нижній.

5. За результатами комп'ютерного моделювання процесу наведення БПЛА на малорухливу ціль підтверджується доцільність застосування запропонованого алгоритму оптимізації ієрархічних систем на основі координованих стабільно-ефективних компромісів.
6. Дослідження проводилося на моделі з повним нелінійним описом, в той час як багатокритеріальні інтерполяційні поверхні були отримані на лінеаризованій моделі. Результати дослідження показали, що застосування даних оптимальних поверхонь має місце при розгляді нелінійної моделі.
7. Також можна відзначити, що спостерігається симетричність отриманих значень оптимальних параметрів щодо бічних зсувів цілі в позитивну і негативну сторону по осі Z щодо направлення вектору швидкості в момент пуску і положення точки пуску.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення мультиагентної системи керування групою незалежних об'єктів з самостійною координацією і прийняттям рішень	1. Сфера доставки вантажів без участі людського персоналу	1. Зменшення вартості доставки. 2. Збільшення швидкості доставки. 3. Зменшення до мінімуму людського фактору.
	2. Сільськогосподарська	1. Контроль росту рослин. 2. Розпил добрив. 3. Збирання/посадка врожаю.
	3. Сфера військових послуг	1. Зведення до мінімуму можливих втрат людського персоналу. 2. Швидка і безпечна доставка військового спорядження в зону бойових дій. 3. Можливість евакуації військовослужбовців або поранених людей з важкодоступної зони. 4. Розвідка. 5. Розмінування.
	4. Правоохорона сфера діяльності	1. Переслідування правопорушників в важкодоступних місцях. 2. Виявлення надзвичайних ситуацій (вибухів, пожеж, аварій...) 3. Попереджувальна (превентивна) правоохорона діяльність.

	5. Сфера інженерної діяльності	1. Розвідка місць майбутнього будівництва. 2. Контроль спорудження об'єктів. 3. Доставка матеріалів в важкодоступні місця. 4. Автоматизація. 5. Економія часу.
--	--------------------------------	--

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1 Amazon	Конкурент2 DHL	Конкурент3 DelivAir			
1.	Тип переміщення	Наземний, надземний	Наземний, надземний	Надземний	Надземний			Кінцевий продукт дешевший, ніж у основного конкурента
2.	Вантажопідйомність(надземна)	До 50 кг	До 50 кг	До 30 кг	До 2 кг		Вантажопідйомність як у основного конкурента	
3.	Максимальна відстань	До 5 км	До 4 км	До 3,5 км	До 1 км			Більша зона покриття

4.	Максимальна швидкість	До 300 км/год	До 280 км/год	До 180 км/год	До 150 км/год			Більша швидкість, ніж у основних конкурентів
5.	Максимальна висота	До 1000 м	До 1000 м	До 120 м	До 30 м		Максимальна висота як у основного конкурента	
6.	Тип доставки	З приземленням, зі зброю, із очікуванням замовника	З приземленням, із очікуванням замовника	З приземленням	Зі зброю			Більша варіація типів доставки замовлень
7.	Заборонена погода для роботи	Шквальний вітер, температура нижча за -10 градусів	Шквальний вітер, температура нижча за 0 градусів	Шквальний вітер, дощ та грози, температура нижча за 0 градусів	Шквальний вітер, дощ та грози, температура нижча за 0 градусів			Краща погодостійкість, ніж у основних конкурентів

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
-------	--------------	--------------------------	----------------------	------------------------

1.	Самостіна взаємодія групи об'єктів	Реалізація за допомогою мільтиагентних систем керування. Взаємодія наземних і надземних об'єктів. Використовується штучний інтелект для взаємодії з навколишнім середовищем (розпізнавання перешкод, людей, схожих систем...).	+	-
2.	Напів самостіна взаємодія групи об'єктів	Реалізація за допомогою мільтиагентних систем керування. Взаємодія наземних і надземних об'єктів. Використовується штучний інтелект для взаємодії з навколишнім середовищем, а також частковий контроль людини в деяких ситуаціях.	+	+
3.	Несамостіна взаємодія групи об'єктів	Реалізація за допомогою мільтиагентних систем керування. Взаємодія наземних і надземних об'єктів. Повний контроль людини в прийнятті рішень.	+	+
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Самостіна взаємодія групи об'єктів, оскільки ця технологія є передовою. Це забезпечить довговічність та технічну новизну, що є важливою характеристикою даного продукту.				

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	20000000 грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає обмежень
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дозволи на надземний рух і зв'язок
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	65%

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Автоматизована система доставок вантажів	Представники логістичної, правоохоронної, військової, сільськогосподарської, інженерної сфери	Основною цільовою групою є логістична – успішна, дешева, швидка доставка є їх основною ціллю.	Система повинна бути автоматизованою, уніфікованою, недорогою, надійною.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Поява нових конкурентів на ринку	Зменшення долі на ринку	Збільшення витрат на рекламу, створення нових технологічних рішень
2.	Знецінення гривні	Зменшення попиту на ринку України	Вливання на іноземний ринок

3.	Заборона на автоматизований рух в певній країні	Униможливлення роботи основної складової	Збільшення людського персоналу
----	---	--	--------------------------------

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Попит на автоматизовані системи доставок	Збільшення долі ринку, можливість розвитку нових систем	Збільшення обсягів виробництва
2.	Зменшення ціни на електричні компоненти та акумулятори	Зменшення собівартості продукту, що призведе до зростання попиту	Вихід на нові ринки збуту

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - чиста	На ринку присутні конкурентних компаній зі схожими технологіями	Зменшення собівартості, автоматизована взаємодія об'єктів, наземна та надземна сфера роботи
2. За рівнем конкурентної боротьби - глобальний	Вихід на зовнішні ринки, відсутність локальних конкурентів	Продаж продукції за мінімально можливою ціною
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Конкуренція на ринку ведеться в логістичній і військовій сфері	Необхідно зосередити зусилля на пошуку конкурентних переваг, які дозволять компанії займати стійкі конкурентні позиції на даному ринку

4. Конкуренція за видами товарів - товарно-родова	Конкуренція на рівні технології задоволення потреб. Існує конкуренція з іншими компаніями	Ведення конкурентної боротьби в технологічній сфері
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Для значної частки споживачів ціна є визначальною при виборі.	Головною конкурентною перевагою є унікальність автоматизованої взаємодії
6. За інтенсивністю - марочна		Диференціація систем

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Amazon, DHL, DelivAir	Відсутні бар'єри входження в ринок	Цінові Значення розміру поставок – відсутні\цінові	Фактор вибору	Розширення функціоналу продукту конкурента
Висновки:	Інтенсивність конкурентоспроможності – помірна.	- є можливості входу в ринок; - наявно 3 головних конкуренти; - строки виходу на ринок: середньострокові.	Постачальники не диктують умов	Споживач обирає необхідний йому форм-фактор та функціонал Приваблива ціна	Обмеження для роботи на ринку через товари-замінники

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
-------	-------------------------------	---

1.	Ціновий	Ціна на продукт
2.	Продуктова диференціація	Наявність різновиду пристрою за функціоналом
3.	Динаміка галузі	Наявність попиту на продукт
4.	Продуктова лінія	Наявність видових різновидів пристрою

Таблиця 4.21 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з продуктом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ціновий	5							
2.	Продуктова диференціація	10							
3.	Динаміка галузі	25							
4.	Продуктова лінія	10							

Таблиця 4.32 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Нові технології Обладнання Експлуатаційні характеристики продукту Функціональність Ресурси Рекламна підтримка	Слабкі сторони: Знання споживачів Відсутність досліджень з приводу аналізу нових каналів збуту
Можливості: Зростання ринку Підтримка зі сторони інвесторів Зарубіжний ринок	Загрози: Внутрішній ринок

Таблиця 4.43 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання засобів стимулювання збуту та мерчандайзингу для збільшення продаж	Отримання ресурсів від інвестицій	До 2-х років

2.	Розширення асортиментної лінійки за рахунок створення нових продуктів	Отримання ресурсів від інвестицій	До 3-х років
3.	Збільшення представленості на міжнародній арені	Отримання довгострокових кредитів	До 5 років

Таблиця 4.54 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Масовий маркетинг(18-60 років)	Споживачі готові сприйняти продукт, для економії власного часу	Орієнтований попит - великий	Конкуренція представлена 6-ма виробниками зі світовим ім'ям	Середня з майбутньою перспективою
Які цільові групи обрано: було обрано масовий маркетинг – робота із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги)					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Конкурентна стратегія	Посилити використання таких конкурентних переваг як унікальне позиціонування	1. Висока брендованість споживчого сприйняття; 2. Посилення тиску зі сторони товарів конкурентів	Стратегія лідерства по витратах

		я та рівень диференціації		
2.	Цінова стратегія	Даний метод дозволить регулювати ціни в залежності від витрат виробництва, а також забезпечити цільовий прибуток	1.Регулювання цін на логістичну діяльність з боку держави; 2.Дефіцит якісного людського персоналу; 3.Зростання цін на витратні матеріали; 4.Коливання попиту.	Стратегія диференціації
3.	Стратегія просування	Для збільшення обсягів реалізації, формування лояльності споживачів	1. Зростання числа клієнтів; 2. Висока брендованість споживчого сприйняття 3.Залежність попиту від купівельної спроможності споживачів 5.Збільшення інтенсивності конкуренції між існуючими гравцями	Стратегія спеціалізації

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
-------	--	--	---	----------------------------------

	Ні	Компанія буде шукати нових споживачів і забитрати існуючих у конкурентів	Компанія буде копіювати лише технічну частину	Стратегія виклику лідера
--	----	--	---	--------------------------

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
	1. Швидка доставка 2. Якісна доставка 3. Прийнятна ціна 4. Зручність клієнта	Стратегія лідерства по витратах	1. Швидкість 2. Автономність 3. Надійність 4. Вантажопійомність 5. Точність	1. Ціна 2. Надійність 3. Автономність

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Зручність	Цілодобова робота в будь-якому місці	Робота в густонаселених містах
2.	Ціна	Дешевше, ніж у конкурентів	Дешевше, ніж у конкурентів
3.	Якість	Робота в незадовільних погодних умовах	Удосконалення існуючих стандартів
4.	Дальність	Більше покриття	Використання симбіозу наземних і надземних систем

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
--------------	----------------------

I. Товар за задумом	Мультиагентна системи керування групою незалежних об'єктів з самостійною координацією і прийняттям рішень		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Тип надземного робота (багатогвинтовий)	Нм	Тх
	2. Тип наземного робота (колісний)	Нм	Тх
	3. Живлення (електроенергія)	М	Тл
	4. Автоматизована система	Нм	Тл
	5. Захищеність від механічних впливів	Нм	Тх
	6. Зв'язок системи	Нм	Тл
	Якість: тестування за державними і міжнародними стандартами		
	Пакування: коробочне з нанесенням обов'язкової інформації		
	Марка: в процесі розробки		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: інформацію про товар можна дізнатися з відповідних місць продажу		
	Після продажу: повністю готовий для налаштування і роботи		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: товар буде захищено за рахунок інтелектуальної власності і новітніх розроблених систем (ноу-хау)			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	Більше 75000 грн	Більше 40000	Більше 400000	Від 25000 до 500000

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	залучена система збуту	Доставляти товар до клієнтів, надавати всю ознайомчу інформацію	Вертикальна система	Багатоканальні системи збуту

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Люди з вираженим почуттям належності до середнього класу	Інтернет	Доступність та об'єктивність інформації про фірму та товар	Вплив на процес прийняття рішення про купівлю	Підкреслення переваг продукту

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджена математична модель дворівневої багатоканальної ієрархічної системи управління МАС з перехресними зв'язками.
2. Досліджена стратегія міжрівневого координування на основі узагальнення ієрархічного врівноваження за Штакельбергом.
3. Досліджено і удосконалено метод оптимізації ієрархічної системи управління динамічним об'єктом на основі координованих стабільно-ефективних компромісів.
4. Отримано рішення лінійно-квадратичної задачі багатокритеріального синтезу дворівневої системи управління на основі координованих стабільно-ефективних компромісів.
5. Досліджене алгоритмічне забезпечення методу оптимізації управління високоманевреним МАС з ієрархічною системою наведення-стабілізації з коректованим двоканальним пропорційним наведенням МАС для підвищення ефективності і координації траєкторією адаптації ССт.
6. Проведено дослідження процесів оптимального управління із застосуванням методу оптимізації ієрархічної системи наведення-стабілізації МАС з різними варіантами опису параметрів системи стабілізації.
7. Досліджена і удосконалена модель системи наведення, що реалізує закон пропорційного наведення з подальшою оптимізацією параметрів. Отримано результати моделювання оптимальної системи наведення з адаптацією ССт, що мають важливе практичне значення.
8. Даний спосіб отримання оптимального управління ієрархічною системою наведення-стабілізації дозволяє контролювати швидкість зміни швидкісного напору, а також швидкість зміни числа Маха під час польоту з метою підвищення якості стабілізації МАС.
9. Проведено багатofакторний аналіз загальних властивостей методики на прикладі дослідження дворівневої системи управління МАС, який показав:

- використання методу оптимізації ієрархічної системи управління динамічним об'єктом на основі КОСТЕК дає позитивні результати, які володіють координаційними властивостями і збалансовані на рівнях ББС, що видно при порівнянні результатів моделювання з результатами, отриманими без застосування методу;
- використання точного опису адаптивних зв'язків ССт дозволяє отримати кращу якість ССт;
- рух до цілі зі зміною траєкторних властивостей системою наведення дозволяє врахувати обмеження на параметри ССт і підвищити якість стабілізації, що призводить до підвищення якості наведення, і відображає підвищення координаційних систем наведення і стабілізації при реалізації методу оптимізації системи управління на основі КОСТЕК.

10. Розроблено стартап-проект, що підтверджує релевантність дослідження і удосконалення методу КОСТЕК для безпілотних апаратів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Абрамов О.В. Выбор параметров настройки технических устройств и систем / Абрамов О.В.. – 2011. – №4. – С. 13–19.
2. Амбарцумян А.А. Групповое управление в дискретнособытийных системах / Амбарцумян А.А., Потехин А.А.. – 2012. – №5. – С. 46–53.
3. Володин В.В. Обоснование выбора методов решения задач оптимального управления сложными процессами / Володин В.В., Мокрова Н.В.. // Вестник ТГТУ. – 2006. – №1. – С. 22–28.
4. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. / Воронов Е.М.. – М.: МГТУ, 2001. – 576 с.
5. Воронов Е.М. Многокритериальная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса / Воронов Е.М.. – 2013. – С. 208–217.
6. Воронов Е.М. Концептуальная модель интеллектуальной системы управления в форме иерархической многоагентной пента-структуры / Воронов Е.М.. – 2013. – С. 3–5.
7. Воронов Е.М. Алгоритмы иерархической оптимизации в двухуровневой многоканальной задаче «управления- регулирования» / Воронов Е.М., Карпунин А.А., Серов В.А.. // 3. – 2009. – С. 1–18.
8. Вайсборд Э.М. Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. / Вайсборд Э.М., Жуковский В.И. – М.: Советское радио, 1980. – 304 с.
9. Гераськин М.И. Графовый метод многокритериальной оптимизации для решения задач выбора управления в иерархических системах корпораций / Гераськин М.И.. // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2014. – №12. – С. 114–124.

10. Горелик В.А. О решении иерархической игры при неопределенности с функциями риска игроков / Горелик В.А., Родюков А.В., Тараканов А.Ф.. // Т.. – 2006. – №1. – С. 15–33.
11. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. / Choset H., Lynch K., Hutchinson S. та ин.]. – Boston, MA, USA: MIT Press, 2005. – 340 с.
12. Position Estimation and Autonomous Travel by Mobile Robots in Natural Terrain. [Электронный ресурс] // Kent Forum Book.. – 1997. – Режим доступа до ресурсу:
http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/kroftkov_eric_1997_2/kroftkov_eric_1997_2.pdf
 .
13. Integrated long-range UAV/UGV collaborative target tracking. / Moseley M.B., Grocholsky B.P., Cheung C., Singh S.. // Proc. SPIE.. – 2009. – С. 10–13.
14. Li W. A vision-guided autonomous quadrotor in an air-ground multi-robot system. / Li W., Zhang T., Khlhnlennz K.. // ICRA. – 2011. – С. 2980–2985.
15. Chaimowicz L. Aerial shepherds: Coordination among uavs and swarms of robots / Chaimowicz L., Kumar V.. // Springer. – 2007. – №6. – С. 243–252.
16. Ishikawa S. Visual navigation of an autonomous vehicle using white line recognition. / Ishikawa S., Kuwamoto H., Ozawa S.. // Intell. – 1988. – №10. – С. 743–749.
17. Matsumoto Y. Visual navigation using view-sequenced route representation. / Matsumoto Y., Inaba M., Inoue H.. // Minneapolis, MN, USA. – 1996. – С. 83–88.
18. Dao N.X. Visual navigation for indoor mobile robots using a single camera. / Dao N.X., You B.J., Oh S.R.. // IROS. – 2005. – С. 1992–1997.
19. Cherubini A. Visual navigation with obstacle avoidance. / Cherubini A., Chaumette F.. // IROS. – 2011. – С. 1593–1598.
20. Grocholsky B. Efficient target geolocation by highly uncertain small air vehicles. / Grocholsky B., Dille M., Nuske S.. // IROS. – 2011. – С. 4947–4952.

21. Dille M. Persistent Visual Tracking and Accurate Geo-Location of Moving Ground Targets by Small Air Vehicles. / Dille M., Grocholsky B., Nuske S.. // Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace Conference;. – 2011. – C. 372–399.
22. Rao R. Visual servoing of a UGV from a UAV using differential flatness. / Rao R., Kumar V., Taylor C.. // IROS. – 2003. – C. 743–748.
23. Air-ground robotic ensembles for cooperative applications: Concepts and preliminary results. / Elfes A., Bergerman M., Carvalho J.R.H. та ін.]. – 1999. – C. 75–80.
24. Pursuit-evasion games with unmanned ground and aerial vehicles. / Vidal R., Rashid S., Sharp C. та ін.]. // Seoul, Korea. – 2001. – C. 2948–2955.
25. Phan C. A cooperative UAV/UGV platform for wildfire detection and fighting. / Phan C., Liu H.. // Beijing, China. – 2008. – №7. – C. 494–498.
26. Experiments in Multirobot Air-Ground Coordination. / Chaimowicz L., Grocholsky B., Keller J.F. та ін.]. // Barcelona, Spain. – 2004. – C. 4053–4058.
27. MacArthur E.Z.,. Use of cooperative unmanned air and ground vehicles for detection and disposal of mines. / MacArthur E.Z., MacArthur D., Crane C.. // SPIE. – 2005. – C. 94–101.
28. Field tests with an aerial–ground convoy system for collaborative tasks. / Valente J., Barrientos A., Martinez A., Fiederling C.. // Madrid, Spain. – 2010. – №8. – C. 233–248.
29. Snyder J.P. Map Projections: A Working Manual. U.S. Geological Survey / Snyder J.P.. // U.S. Government Printing Office. – 1987. – C. 1532.
30. Gadeyne K. BFL: Bayesian Filtering Library [Електронний ресурс] / Gadeyne K.. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.orocos.org/bfl>.
31. Towards a ground navigation system based in visual feedback provided by a mini UAV. / Garzon M., Valente J., Zapata D. та ін.]. // Alcal de Henares, Spain. – 2012. – C. 112–117.
32. Reynolds C.W. Steering Behaviors For Autonomous Characters. / Reynolds C.W.. // San Jose, CA, USA.. – 1999. – C. 763–782.

33. Трубніков Г. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях / Г. В. Трубніков. – 2008. – С. 1.
34. Baxter J. W. Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System / J. W. Baxter, G. S. Horn, D. P. Leivers. // QinetiQ Ltd Malvern Technology Centre St Andrews Road. – 2007.
35. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. О. Скобелев. – Самара, 2003. – 418 с. – (Автометрия). – (6).
36. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К. С.Амелин, Е. И. Антал, В. И. Васильев, Н. О. Граничина. // СПГУ. – 2009. – С. 160–161.
37. Попов В. А. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом / В. А. Попов, Д. В. Федутинов. // ФГУП "ГосНИИАС".
38. Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Д. Я. Иванов. // Известия ЮФУ. – С. 222–225.
39. Yang Y. Multi-UAV cooperative search using an opportunistic learning method. / Yang Y, Polycarpou M, Minai A., 2007. – 716 с. – (Control).
40. An Aerial-Ground Robotic System for Navigation and Obstacle Mapping in Large Outdoor Areas. Sensors. / Garzón M., Valente J, Zapata D, Barrientos A. // PMC. – 2013. – №13. – С. 1247–1267.
41. Multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Cooperative Fault Detection Employing Differential Global Positioning (DGPS), Inertial and Vision Sensors. / Heredia G., Caballero F, Maza I та ін.], 2009. – 7566 с. – (PMC). – (9).
42. Yang Y. Decentralized cooperative search by networked UAVs in an uncertain environment. / Yang Y., Minai A, Polycarpou M. – Boston, MA, USA, 2004. – 5558 с. – (Proceedings of the American Control Conference).
43. Arai T. Editorial: Advances in multi-robot systems / Arai T, Pagello E, Parker L.E. – Autom, 2002. – 655 с. – (IEEE Trans). – (18).

44. Schwager M. Decentralized Adaptive Coverage Control for Networked Robots / Schwager M, Rus D., Slotine J., 2009. – 357 c. – (Robot. Res). – (28).
45. Horn R. Matrix Analysis / Horn R, Johnson C.. // Cambridge University Press. – 1990. – C. 68–74.
46. Hu J. Distributed cooperative control for deployment and task allocation of unmanned aerial vehicle networks. / Hu J, Xu Z., 2013. – 1574 c. – (IET Control Theory Appl). – (7).
47. Bertuccelli L. Robust UAV search for environments with imprecise probability maps. / Bertuccelli L, How J.. – Seville, Spain, 2005. – 5680 c. – (Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control).
48. Xiao L. A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. / Xiao L, Boyd S, Lall S. – Los Angeles, CA, USA., 2005. – 63 c. – (Proceedings of the 4th International Symposium Information Processing in Sensor Networks;).
49. Alfaris A. Hierarchical decomposition and multidomain formulation for the design of complex sustainable systems / Alfaris A.. – 2010. – №9. – C. 132.
50. Beard R.W., Galerkin approximations of the generalized Hamilton-Jacobi-Bellman equation / Beard R.W., Saridis G.N., Wen J.T.. // Automatica. – 1997. – №12. – C. 33.
51. Berbyuk V.E., Optimization problems of controlled multibody systems having spring-dampers actuators / Berbyuk V.E., Bostrom A.E.. – 2001. – №7. – C. 37.
52. Busenhardt M.A. Hierarchical control of rigid multibody systems: dissertation / Busenhardt M.A.. // Zuerich. – 1994.
53. Forsgren A. Inertia-controlling factorizations for optimization algorithms / Forsgren A.. – 2002. – №43. – C. 91–107.
54. Lemch E.S. Nonlinear and hierarchical hybrid control systems / Lemch E.S.. // Canada. – 2000. – C. 4.
55. Wang L.-X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy systems / Wang L.-X.. // Automatica. – 1997. – №6. – C. 1041.

56. West M.E. Robust H-infinite methods towards the control and navigation of autonomous underwater vehicles / West M.E.. // Hawaii. – 2006. – С. 121.
57. Горелик В.А. Иерархическая игра в условиях неопределенности с использованием функций риска игроков и гарантированной оценки стратегий / Горелик В.А., Родюков А.В., Тараканов А.Ф.. // 6. – 2009. – С. 94–101.
58. Гродецкий В.И. Многокритериальная оптимизация генетическими алгоритмами в задачах управления активными системами / Гродецкий В.И., Тененев В.А.. // 10. – 2007.
59. Диго Г.Б. Применение многометодных вычислительных схем в оптимальном параметрическом синтезе технических устройств и систем / Диго Г.Б., Диго Н.Б.. – 2011. – №4. – С. 26–30.
60. Добровидов А.В. Оптимизация траектории движения объекта по вероятностному критерию в режиме пассивной гидролокации в анизотропной среде / Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М.. – 2014. – №4. – С. 31–37.
61. Добровидов А.В. Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде / Добровидов А.В., Кулида Е.Л., Рудько И.М.. – 2011. – №3. – С. 64–75.
62. Дыхта В.А. Неравенства Еамильтона-Якоби в оптимальном управлении: гладкая двойственность и улучшение / Дыхта В.А.. – 2010. – №1. – С. 405–426.
63. Бабич В.М.,. Асимптотическое решение уравнения Гамильтона-Якоби, сосредоточенное вблизи поверхности / Бабич В.М., Попов А.И.. – 2011. – №393. – С. 23–28.
64. Елтаренко Е.А. Описание предпочтений в многокритериальных задачах с иерархической системой критериев / Елтаренко Е.А.. – 2013. – №2. – С. 2–10.
65. Жильцов А.И. Технология разработки системы управления полетом для беспилотного летательного аппарата с помощью геометрического метода / Жильцов А.И.. – 2013. – №2. – С. 1.
66. Зак Ю.А. Адаптивные методы глобального случайного поиска в решении одного класса многоэкстремальных задач в условиях ограничений / Зак Ю.А.. – 2012. – №1. – С. 20–27.

67. Кабанов Д.С. Оптимизация пространственного маневра автоматического подводного аппарата с коррекцией параметров структуры управления / Кабанов Д.С.. – 2012. – №9. – С. 57–61.
68. Карпенко А.П., Когенетический алгоритм Парето-аппроксимации в задаче многокритериальной оптимизации / Карпенко А.П., Митина Е.В., Семенихин А.С.. – 2013. – №1. – С. 22–32.
69. Ванин А.В. Координированные стабильно-эффективные компромиссы оптимизации иерархических систем управления в двухуровневой многоканальной системе «наведение- стабилизация» летательного аппарата : дис. канд. техн. наук : 05.13.01 / Ванин А.В.. – Москва, 2016. – 203 с.

ДОДАТОК А – ТЕЗИ

Problems of a group of autonomous moving objects in 3D space

Dolyna Viktor Georgyovych
docent, PhD
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
v_79@ukr.net

Prilipukhov Yevhenii Vadymovych
student
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
prilipukhov2008@gmail.com

Abstract. This paper addresses the problem of managing a group of unmanned vehicles. Described trends unmanned systems. Two methods of solving problems with the management of objects in groups, such as multi-agent method and the method of swarm intelligence.

Keywords: unmanned systems, UAV, swarm intelligence, multi-agent method, microcomputer.

Проблеми управління групою автономних рухомих об'єктів у 3D просторі

Долина Віктор Георгійович
доцент, к.т.н.
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
v_79@ukr.net

Пріліпухов Євгеній Вадимович
студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
prilipukhov2008@gmail.com

Анотація. В роботі розглядається проблема керування групою безпілотних апаратів. Описані тенденції розвитку безпілотних систем. Розглянуті два методи вирішення проблем з керуванням об'єктів у групах, а саме мультиагентний метод і метод ройового інтелекту.

Ключові слова: безпілотні системи, БПЛА, ройовий інтелект, мультиагентний метод, мікрокомп'ютер.

В сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) користуються все більшою популярністю в якості малих, легких і недорогих інструментів для доставки вантажів, наукових цілей, геологічної розвідки, повітряних зйомок, військової та правоохоронної справи. До недавнього часу БПЛА використовувались переважно у військовій справі, але з плином часу і при швидкому розвитку техніки виникають нові можливості та з'являються різноманітні задачі цивільного призначення. У всьому світі ведуться і впроваджуються розробки з використанням БПЛА в області комерційних вантажоперевезень,

сільськогосподарській діяльності, у пошуково-рятувальних і різних моніторингових задачах[1]. Однією із головних переваг використання БПЛА є відсутність людського фактору при виконанні поставленої задачі, який може зіграти негативну роль в надзвичайних ситуаціях.

На теперішній час для виконання різноманіття поставлених задач досить розповсюджене використання не одного БПЛА, а декількох, які утворюють певну групу в якій окремі БПЛА виконують власні, проте, схожі між собою, задачі. Більшість сучасних систем управління групою БПЛА характеризуються відсутністю автономного прийняття нових, складних задач, що дозволяють групі БПЛА оперативно приймати ефективні рішення по зміні сценарію виконання поставлених задач. Типовими прикладами подій, що викликають необхідність в постановці нових задач є: поява нової вигідної інформації, для більш ефективного виконання задач, вихід зі строю частини деталей або ресурсів, а також зміна критеріїв прийняття рішень. Чим більша неоднозначність, більш розподілений характер процесів прийняття рішень і чим частіше трапляються незаплановані події, тим нижча

ефективність сучасних систем, які не можуть самостійно приймати рішення і в автоматичному режимі перебудовуватися під зміни навколишнього середовища. Крім того, будь-яка модифікація схем прийняття рішень в традиційних системах представляє собою дуже складний в розумінні і виконанні процес, що потребує високої кваліфікації розробників[2], що, в свою чергу, суттєво збільшує вартість розробки і експлуатації таких систем.

На теперішній час для вирішення проблем управління групою безпілотних рухомих об'єктів (БРО) існує два граничних підходи: мультиагентний метод і метод ройового інтелекту. Між цими двома підходами існує поле можливих їхніх комбінацій, які необхідно досліджувати і визначати оптимальні з урахуванням вирішуваних задач. БПЛА є різновидом БРО і всі ці підходи також можуть бути застосовані для керування групою БПЛА.

В основі мультиагентного методу лежить поняття «агента», програмного об'єкта, розташованого на кожному окремому БПЛА, який за допомогою датчиків дозволяє сприймати ситуацію, приймати рішення і взаємодіяти з подібними системами. Характерними особливостями технології є:

- здатність до колективної, цілеспрямованої поведінки в інтересах вирішення загальної задачі;
- автономність, тобто здатність самостійно вирішувати локальні задачі;
- здатність до активних дій заради досягнення загальних або локальних цілей;
- адаптивність, тобто можливість автоматично пристосовуватись до динамічно-змінюваного середовища;
- можливість активно переміщуватися, цілеспрямовано шукати і знаходити інформацію, енергію, об'єкти і ресурси які необхідні для колективного вирішення задачі[3].

Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від інших існуючих для управління групою незалежних, автономних об'єктів.

Таким чином, для створення мультиагентної системи для групи БПЛА кожен БПЛА має бути обладнаний наступними приладами:

- невеликий за масою, але потужний мікрокомп'ютер для роботи в реальному часі;
- датчики для визначення поточного стану БПЛА;
- датчики для визначення положення БПЛА та дослідження оточуючого простору;
- засоби зв'язку для організації впевненого обміну даними «агентів» між собою;
- виконавчі пристрої та джерело живлення.

На мікрокомп'ютер одного «агента» серед групи БПЛА покладається вирішення таких задач:

- визначення точного місцезнаходження;
- визначення ступеня виконання задач;

- обмін даними з іншими «агентами» системи;
- порівняння своїх даних з поставленою задачею;
- корегування власних дій за прийнятими даними;
- управління виконавчими пристроями.

Мікрокомп'ютер у БПЛА відповідає за функцію низького та високого рівня управління. Низькорівнева система керування відповідає за роботу давачів і виконавчих пристроїв. Система керування високого рівня відповідає за стійкий рух, вирівнювання апарату, направлення руху, корегування та підтримання потрібного курсу, а також, в цілому, за виконання своєї задачі. Керування людиною обмежується постановкою глобальних задач[4].

Іншим підходом вирішення проблем управління групою безпілотних об'єктів є метод ройового інтелекту.

Ройовий інтелект – це аналог природного поведінки тварин у великих децентралізованих групах, в яких керування відбувається на принципах самоорганізації.

В групі безпілотних апаратів, які взаємодіють на основі ройового інтелекту, кожен апарат здійснює взаємодію лише з декількома, найближчими до нього в даний момент, апаратами. При цьому дальність зв'язку та енерговитрати на інформаційну передачу відносно невеликі. Безпілотні апарати приймають рішення щодо поточної поведінки, спираючись на самостійно зібрані дані про навколишнє середовище, а також на дані сусідніх апаратів. Енерговитратний зв'язок з центральним пристроєм керування відбувається дуже рідко, і не зі всіма апаратами групи, і лише для того, щоб отримати інформацію по задачах, які стоять перед групою та для передачі інформації про стан групи, хід виконання задачі та інших даних.

Методи ройової взаємодії вже знаходять своє використання в задачах управління великими групами наземних мобільних роботів (Swarm-bots), що може слугувати підтвердженням того, що використання цього методу для груп БПЛА може виявитися дуже ефективним[5].

Використання ройових методів взаємодії в групах БПЛА допоможе вирішити ще одну проблему – збір даних про навколишнє середовище. Габарити БПЛА можуть істотно обмежувати доступний набір бортових датчиків та їхній діапазон дії. Обмежений енергоресурс також погано впливає на допустимі енерговитрати засобів збору даних про навколишнє середовище, що призводить до зменшення радіусу роботи активних засобів збору даних, таких як лазерні далекоміри, ультразвукові датчики, системи орієнтації тощо. Ці обмеження призводять до того, що БПЛА може самостійно зібрати інформацію лише з певної області навколо себе. Хоча для забезпечення стійкого руху апарат потребує даних про нерухомі і рухомі об'єкти, що розташовані в значно більшій зоні, особливо по курсу руху. При ройовій взаємодії в групі, сусідні апарати обмінюються інформацією про навколишнє середовище, розширюючи таким чином доступні всім дані про

перешкоди, повітряні потоки та інші важливі параметри середовища.

Виконання групою безпілотних апаратів загальної задачі потребує дотримання певних дистанцій між апаратами. Наприклад, при виконанні задач збору інформації на певній території, БПЛА повинні літати на таких дистанціях, щоб мінімізувати перекривання робочих зон сенсорних датчиків і, в той же час, не допускати «пробілів» на мапі[6]. При ройовій взаємодії, кожен БПЛА визначає дистанції до сусідів і сам корегує свій курс таким чином, щоб дотримуватись потрібних дистанцій між апаратами, і не зближуватись з перепонами.

Таким чином використання мультиагентного підходу дозволяє управляти групою БПЛА умовно незалежних, що виконують задачі, які істотно відрізняються одна від одної. При використанні ройових методів всі БПЛА покликані виконувати одну загальну задачу і діють як розподілений об'єкт. Проаналізувавши відмінності обох підходів основні висновки зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Особливості використання мультиагентного і ройового підходів до управління групою БПЛА

Критерій	Мультиагентний підхід	Ройовий підхід
Автономність групи	Група БПЛА може діяти автономно	Група може діяти автономно
Автономність окремого БПЛА	Окремий БПЛА може діяти цілком автономно	Окремому БПЛА необхідна постійна комунікація з членами групи
Розміри групи	Від одного БПЛА	Група має складатись з кількох БПЛА, що дадуть змогу їй ефективно функціонувати
Кількість виконуваних групою задач	Фактично кожен БПЛА в групі може виконувати окрему задачу	Група виконує одну розподілену або невелику кількість схожих задач
Розміри окремого БПЛА	БПЛА повинен мати достатні розміри, аби нести на собі всі необхідні для автономного польоту датчики і засоби комунікації	БПЛА може мати мінімальні розміри, проте має нести на собі деякі датчики і засоби комунікації

Комунікаційні можливості	Кожен БПЛА повинен мати можливість комунікації з координаційним центром	Кожен БПЛА повинен мати можливість комунікації з членами групи
Можливість використання БПЛА різних модифікацій	Можуть бути використані БПЛА різних модифікацій для виконання різних окремих завдань	Можуть бути використані БПЛА різних модифікацій для забезпечення ефективності функціонування групи
Вартість окремого БПЛА	Вартість окремого БПЛА висока	Вартість окремого БПЛА невисока

Отримані результати ілюструють те, що мультиагентний підхід варто використовувати у разі виконання БПЛА в складі групи окремих задач і забезпечення обміну між ними даними, що не мають критичної терміновості. Проблема уникнення несподіваних зіткнень між БПЛА лежить на датчиках і знанні маршрутів руху інших БПЛА.

Ройовий підхід слід використовувати, коли для виконання окремої задачі або групи схожих задач використовується велика кількість порівняно недорогих БПЛА, які функціонують як розподілений у просторі об'єкт, частини якого постійно обмінюються між собою інформацією про свій стан.

Подальшими шляхами дослідження є створення моделей впливу тих чи інших критеріїв на ефективність автономної роботи групи БПЛА які виконують конкретні задачі як то доставка вантажів, правоохоронна діяльність, тощо.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Трубіников Г. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях / Г. В. Трубіников. – 2008. – С. 1.
2. Baxter J. W. Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System / J. W. Baxter, G. S. Horn, D. P. Leivers. // QinetiQ Ltd Malvern Technology Centre St Andrews Road. – 2007.
3. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. О. Скобелев. – Самара, 2003. – 418 с. – (Автоматизация). – (6).
4. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К. С.Амелин, Е. И. Антал, В. И. Васильев, Н. О. Граничина. // СПГУ. – 2009. – С. 160–161.

5. Попов В. А. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом / В. А. Попов, Д. В. Федутин. // ФГУП "ГосНИИАС".
6. Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Д. Я. Иванов. // Известия ЮФУ. – С. 222–225.

ДОДАТОК Б – СТАТТЯ

Models and methods of managing a group of independent movable objects in 3D space

Dolyna Viktor Georgyovych
docent, PhD
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
v_79@ukr.net

Prilipukhov Yevhenii Vadymovych
student
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
prilipukhov2008@gmail.com

Abstract. The problem of management of a group of unmanned machines is considered in the paper. The development trends of unmanned systems are described. The mathematical methods of finding the optimal path and purpose recognition, namely, the method of co-operative search of several mobile ground targets by a group of unmanned aerial vehicles with limited possibilities of sensing and communication, management of the swarm of dynamic objects based on the achievement of consensus are considered.

Keywords: unmanned vehicle, local voting protocol, swarm intelligence, multi-agent method, ground target.

Моделі і методи управління групою незалежних рухомих об'єктів у 3D просторі

Долина Віктор Георгійович
доцент, к.т.н.
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
v_79@ukr.net

Пріліпухов Євгеній Вадимович
студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
prilipukhov2008@gmail.com

Анотація. В роботі розглядається проблема керування групою безпілотних апаратів. Описані тенденції розвитку безпілотних систем. Розглянуто математичні методи знаходження оптимального шляху і розпізнавання цілей, а саме метод кооперативного пошуку кількох мобільних наземних цілей групою безпілотних літальних апаратів з обмеженими можливостями зондування та зв'язку, управління роєм динамічних об'єктів на основі досягнення консенсусу.

Ключові слова: безпілотний апарат, протокол локального голосування, ройовий інтелект, мультиагентний метод, наземна ціль.

ВСТУП

В сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) користуються все більшою популярністю в якості малих, легких і недорогих інструментів для доставки вантажів, наукових цілей, геологічної розвідки, повітряних зйомок, військової та правоохоронної справи. До недавнього часу БПЛА використовувались переважно у військовій справі,

але з плином часу і при швидкому розвитку техніки виникають нові можливості та з'являються різноманітні задачі цивільного призначення. У всьому світі ведуться і впроваджуються розробки з використанням БПЛА в області комерційних вантажоперевезень, сільськогосподарській діяльності, у пошуково-рятувальних і різних моніторингових задачах[1]. Однією із головних переваг використання БПЛА є відсутність людського фактору при виконанні поставленої задачі, який може зіграти негативну роль в надзвичайних ситуаціях.

На теперішній час для виконання різноманітних поставлених задач досить розповсюджене використання не одного БПЛА, а декількох, які утворюють певну групу в якій окремі БПЛА виконують власні, проте, схожі між собою, задачі. Більшість сучасних систем управління групою БПЛА характеризуються відсутністю автономного прийняття нових, складних задач, що дозволяють групі БПЛА оперативно приймати ефективні рішення по зміні сценарію виконання поставлених задач. Типовими прикладами подій, що викликають необхідність в

постановці нових задач є: поява нової вигідної інформації, для більш ефективного виконання задач, вихід зі строю частини деталей або ресурсів, а також зміна критеріїв прийняття рішень. Чим більша неоднозначність, більш розподілений характер процесів прийняття рішень і чим частіше трапляються незаплановані події, тим нижча ефективність сучасних систем, які не можуть самостійно приймати рішення і в автоматичному режимі перебудовуватися під зміни навколишнього середовища. Крім того, бідь-яка модифікація схем прийняття рішень в традиційних системах представляє собою дуже складний в розумінні і виконанні процес, що потребує високої кваліфікації розробників[2], що, в свою чергу, суттєво збільшує вартість розробки і експлуатації таких систем.

На теперішній час для вирішення проблем управління групою безпілотних рухомих об'єктів (БРО) існує два граничних підходи: мультиагентний метод і метод ройового інтелекту. Між цими двома підходами існує поле можливих їхніх комбінацій, які необхідно досліджувати і визначати оптимальні з урахуванням вирішуваних задач. БПЛА є різновидом БРО і всі ці підходи також можуть бути застосовані для керування групою БПЛА.

ОЗНАЙОМЛЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МЕТОДУ ТА МЕТОДУ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

В основі мультиагентного методу лежить поняття «агента», програмного об'єкта, розташованого на кожному окремому БПЛА, який за допомогою датчиків дозволяє сприймати ситуацію, приймати рішення і взаємодіяти з подібними системами. Характерними особливостями технології є:

- здатність до колективної, цілеспрямованої поведінки в інтересах вирішення загальної задачі;
- автономність, тобто здатність самостійно вирішувати локальні задачі;
- здатність до активних дій заради досягнення загальних або локальних цілей;
- адаптивність, тобто можливість автоматично пристосовуватись до динамічно-змінюваного середовища;
- можливість активно переміщуватися, цілеспрямовано шукати і знаходити інформацію, енергію, об'єкти і ресурси які необхідні для колективного вирішення задачі[3].

Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від інших існуючих для управління групою незалежних, автономних об'єктів.

Таким чином, для створення мультиагентної системи для групи БПЛА кожен БПЛА має бути обладнаний наступними приладами:

- невеликий за масою, але потужний мікрокомп'ютер для роботи в реальному часі;
- датчики для визначення поточного стану БПЛА;

- датчики для визначення положення БПЛА та дослідження оточуючого простору;
- засоби зв'язку для організації впевненого обміну даними «агентів» між собою;
- виконавчі пристрої та джерело живлення.

На мікрокомп'ютер одного «агента» серед групи БПЛА покладається вирішення таких задач:

- визначення точного місцезнаходження;
- визначення ступеня виконання задач;
- обмін даними з іншими «агентами» системи;
- порівняння своїх даних з поставленою задачею;
- корегування власних дій за прийнятими даними;
- управління виконавчими пристроями.

Мікрокомп'ютер у БПЛА відповідає за функцію низького та високого рівня управління. Низькорівнева система керування відповідає за роботу давачів і виконавчих пристроїв. Система керування високого рівня відповідає за стійкий рух, вирівнювання апарату, направлення руху, корегування та підтримання потрібного курсу, а також, в цілому, за виконання своєї задачі. Керування людиною обмежується постановкою глобальних задач[4].

Іншим підходом вирішення проблем управління групою безпілотних об'єктів є метод ройового інтелекту.

Ройовий інтелект – це аналог природного поведінки тварин у великих децентралізованих групах, в яких керування відбувається на принципах самоорганізації.

В групі безпілотних апаратів, які взаємодіють на основі ройового інтелекту, кожен апарат здійснює взаємодію лише з декількома, найближчими до нього в даний момент, апаратами. При цьому дальність зв'язку та енерговитрати на інформаційну передачу відносно невеликі. Безпілотні апарати приймають рішення щодо поточної поведінки, спираючись на самостійно зібрані дані про навколишнє середовище, а також на дані сусідніх апаратів. Енерговитратний зв'язок з центральним пристроєм керування відбувається дуже рідко, і не зі всіма апаратами групи, і лише для того, щоб отримати інформацію по задачах, які стоять перед групою та для передачі інформації про стан групи, хід виконання задачі та інших даних.

Методи ройової взаємодії вже знаходять своє використання в задачах управління великими групами наземних мобільних роботів (Swarm-bots), що може слугувати підтвердженням того, що використання цього методу для груп БПЛА може виявитися дуже ефективним[5].

Використання ройових методів взаємодії в групах БПЛА допоможе вирішити ще одну проблему – збір даних про навколишнє середовище. Габарити БПЛА можуть істотно обмежувати доступний набір бортових датчиків та їхній діапазон дії. Обмежений енергоресурс також погано впливає на допустимі енерговитрати засобів збору даних про навколишнє середовище, що призводить до зменшення радіусу роботи активних засобів збору даних, таких як лазерні далекоміри, ультразвукові датчики, системи

орієнтації тощо. Ці обмеження призводять до того, що БПЛА може самостійно зібрати інформацію лише з певної області навколо себе. Хоча для забезпечення стійкого руху апарат потребує даних про нерухомі і рухомі об'єкти, що розташовані в значно більшій зоні, особливо по курсу руху. При ройовій взаємодії в групі, сусідні апарати обмінюються інформацією про навколишнє середовище, розширюючи таким чином доступні всім дані про перешкоди, повітряні потоки та інші важливі параметри середовища.

Виконання групою безпілотних апаратів загальної задачі потребує дотримання певних дистанцій між апаратами. Наприклад, при виконанні задач збору інформації на певній території, БПЛА повинні літати на таких дистанціях, щоб мінімізувати перекривання робочих зон сенсорних датчиків і, в той же час, не допускати «пробілів» на мапі[6]. При ройовій взаємодії, кожен БПЛА визначає дистанції до сусідів і сам корегує свій курс таким чином, щоб дотримуватись потрібних дистанцій між апаратами, і не зближуватись з перепонами.

Таким чином використання мультиагентного підходу дозволяє управляти групою БПЛА умовно незалежних, що виконують задачі, які істотно відрізняються одна від одної. При використанні ройових методів всі БПЛА покликані виконувати одну загальну задачу і діють як розподілений об'єкт. Проаналізувавши відмінності обох підходів основні висновки зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Особливості використання мультиагентного і ройового підходів до управління групою БПЛА

Критерій	Мультиагентний підхід	Ройовий підхід
Автономність групи	Група БПЛА може діяти автономно	Група може діяти автономно
Автономність окремого БПЛА	Окремий БПЛА може діяти цілком автономно	Окремому БПЛА необхідна постійна комунікація з членами групи
Розміри групи	Від одного БПЛА	Група має складатись з кількох БПЛА, що дадуть змогу їй ефективно функціонувати
Кількість виконуваних групою задач	Фактично кожен БПЛА в групі може виконувати окрему задачу	Група виконує одну розподілену або невелику кількість схожих задач
Розміри окремого БПЛА	БПЛА повинен мати достатні	БПЛА може мати

	розміри, аби нести на собі всі необхідні для автономного польоту датчики і засоби комунікації	мінімальні розміри, проте має нести на собі деякі датчики і засоби комунікації
Комунікаційні можливості	Кожен БПЛА повинен мати можливість комунікації з координаційним центром	Кожен БПЛА повинен мати можливість комунікації з членами групи
Можливість використання БПЛА різних модифікацій	Можуть бути використані БПЛА різних модифікацій для виконання різних окремих завдань	Можуть бути використані БПЛА різних модифікацій для забезпечення ефективності функціонування групи
Вартість окремого БПЛА	Вартість окремого БПЛА висока	Вартість окремого БПЛА невисока

МЕТОД КООПЕРАТИВНОГО ПОШУКУ КІЛЬКОХ МОБІЛЬНИХ НАЗЕМНИХ ЦІЛЕЙ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ОБМЕЖЕНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ ЗОНДУВАННЯ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Оптимальним підметодом в мультиагентному підході пошуку цілей і створення вірогідностей появи цілей, і перепон є кооперативний пошук кількох наземних мобільних об'єктів на базі бачення у групі безпілотних літальних апаратів з обмеженими можливостями зондування та зв'язку. Основна ідея даного підметоду полягає в тому, що запропонована розподілена стратегія інформаційного обміну та кооперативного контролю для пошуку кількох мобільних цілей з використанням багатоагентних мереж на основі імовірнісних виявлень. Крім того, враховуються варіанти зміни ситуації в реальному часі, і вірогідність помилкової сигналізації виявлення цілі, спрацювання якої пов'язано з різною висотою «агента» у тривимірній динаміці. Кожен «агент» під час відпрацювання даної стратегії пошуку ділиться даними про місцеву цільову інформацію та контролює свою поведінку розподіленим способом. На основі моделі оновлення імовірності, запропонованої в [7], створюється узагальнена модель, яка розглядає часткову втрату інформації серед «агентів» (через швидку зміну навколишнього середовища, таку як рух цілей) та передачу частин здобутої до головної системи. Також аналізується вплив вірогідності детектування, що змінює час на оновлення карти, обумовлений тривимірною динамікою БПЛА. Сформульовано проблему оптимізації покриття для збалансування зони покриття та ефективності виявлення.

Запропонована розподілена модель оновлення карти та схема кооперативного контролю, тобто кожен «агент» спілкується тільки з «агентами» в межах діапазону зв'язку.

В цьому підметоді передбачається, що область спостереження $O \in \mathbb{R}^2$ знаходиться на плоскій поверхні і рівномірно розділена на набір видимих областей одного розміру. Припускаємо, що всі БПЛА (або «агенти») використовують ту саму глобальну декартову систему координат, і позиція кожного «агента» позначається як $\mu_i, k = [ci, kT, hi, k]T \in \mathbb{R}^3$ для «агентів» $i (i = 1, 2, \dots, N)$ за час k (як показано на рис. 1), де $c_{i,k} \in \mathbb{R}^2$ є плоскою координатою її проєкції на O , $h_{i,k} \in \mathbb{R}$ є висотою «агента» над O , N це загальна кількість «агентів», а « T » означає операцію транспонування. Припускається, що кожен «агент» має доступ до своєї позиції в будь-який час. Кожна область спостереження асоціюється з ймовірністю або точністю про існування цілі в цій області, яка моделюється за допомогою розподілу Бернуллі: $\theta_{g,k} = 1$ (ціль присутня) з вірогідністю $P_i(\theta_{g,k} = 1)$ і $\theta_{g,k} = 0$ (ціль відсутня) з вірогідністю $1 - P_i(\theta_{g,k} = 1)$ для «агента» i і область спостереження g за час k , де $g \in \mathbb{R}^2$ розташування центру видимої області O . Якщо в області спостереження присутня більше, ніж одна ціль, вони розглядаються як одна ціль[8].

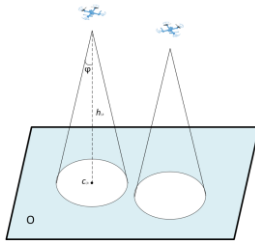


Рис. 1. Пошук цілей декількома БПЛА.

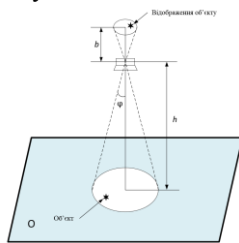


Рис. 2. Зображення цілі, зроблене камерою БПЛА.

Цей підметод в основному призначений для виявлення цілей за допомогою розпізнавання об'єктів, де кожен «агент» несе повітряну камеру спрямовану вниз до області спостереження (як показано на рис. 2). Кожен «агент» незалежно один від одного проводить вимірювання $Z_{i,g,k}$ над областями в середині регіону розпізнавання $C_{i,k}$ за час k , де

$$C_{i,k} \triangleq \{g \in O : \|g - c_{i,k}\| \leq h_{i,k} \tan \varphi\} \quad (1)$$

і $\|\dots\|$ позначає 2-норму для векторів. Припускається, що кожен «агент» має один і той же кут поля зору, половина якого позначається φ . Також припускається, що розмір кожної області розпізнавання досить малий у порівнянні з розміром $C_{i,k}$, тож можна ігнорувати граничний ефект і грубо врахувати, що область повністю перебуває всередині $C_{i,k}$, якщо її центр знаходиться всередині $C_{i,k}$. Для кожної області визначено лише два результати спостереження $Z_{i,g,k} = 0$ і $Z_{i,g,k} = 1$. Для кожної з областей $P(Z_{i,g,k} = 1 | \theta_{g,k} = 1) = p_{i,k}$ і $P(Z_{i,g,k} = 1 | \theta_{g,k} = 0) = q_{i,k}$ вважаються відомими «агенту» як вірогідність виявлення та ймовірність помилкового сигналу відповідно.

Топологія мережі всіх «агентів» в момент часу k моделюється неорієнтованим графом $\zeta_k = (\varepsilon_k, \nu)$. $\nu = \{1, 2, \dots, N\}$ є вершиною і $\varepsilon_k = \{\{i, j\} : i, j \in \nu; \|\mu_{i,k} - \mu_{j,k}\| \leq R_c\}$ є множиною ребер, де кожне ребро $\{i, j\}$ є неузгодженою парою різних «агентів» і R_c є діапазоном зв'язку кожного «агента». Граф або мережа є підключеною, якщо для будь-яких двох вершин i та j існує послідовність ребер (шлях) $\{i, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_{n-1}, v_n\}, \{v_n, j\}$ в ε_k . Позначимо $N_{i,k} = \{j \in \nu | \{i, j\} \in \varepsilon_k\} \cup \{i\}$ як сукупність сусідів «агента» i за час k , де «агентом» вважається сусід самого себе. Кількість сусідів «агента» i в момент часу k позначається як $d_{i,k} = |N_{i,k}|$. [9]

КООПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ПОКРИТТЯ

У цьому розділі буде досліджена спільна стратегія управління, яка оптимізує траєкторії агентів для цільового пошуку, виходячи з оновлених знань про цільову інформацію в режимі реального часу. Впродовж кожного інтервалу агент перш за все оновлює свою карту вірогідності за допомогою схеми оновлення карти, а потім приймає контрольне рішення про те, в яке місце він повинен перейти до наступного спостереження шляхом колективної оптимізації, яка буде розглянута в цьому розділі. Ці два етапи роблять всю мережу формою замкнутої системи зондування та зворотного зв'язку.

Розглянемо модель руху маршрутної точки для кожного агента:

$$\mu_{i,k} = \mu_{i,k-1} + u_{i,k} \quad (2)$$

де $u_{i,k} \in \mathbb{R}^3$ є контрольним входом (або зміщенням точок маршруту) i -го агента в момент часу k . Зверніть увагу, що наведена модель руху стосується тільки точок відліку агентів на етапах дискретного часу. Реальна динаміка агентів не розглядається в цій статті, оскільки тоді результати будуть обмежені динамічною моделлю будь-якого конкретного типу БПЛА. Постає питання – як зробити, щоб агенти вчасно досягали бажаних точок маршрутів, і це технічна проблема, яка не буде розглянута в цій статті, але її потрібно вирішити в реальних системних експериментах. Задача, яка стоїть – оптимізувати вибір наступної маршрутної точки $u_{i,k}$, для кожного агента існує поточна точка шляху $u_{i,k-1}$.

Розглянемо загальну формулу вірогідності оновлення карти:

$$Q_k = G_k + (W_k \otimes I)V_k \quad (3)$$

де $G_k \triangleq e^{-\alpha T} (W_k \otimes I)A_k Q_{k-1} + (W_k \otimes I)\xi_k$. За час $k-1$, G_k може розглядатися як попередня інформація, і V_k інформація, зібрана з вимірювань. Оскільки V_k і $E[V_k]$ пов'язані з істинним існуванням цілі, яка невідома, ми не можемо передбачити значення Q_k або $E[Q_k]$ перед вимірюваннями. Те, що ми можемо зробити за час $k-1$, полягає в тому, щоб знайти оптимальну позицію вибірки в наступному місці $\mu_{i,k}$, щоб максимізувати інформацію, яка буде зібрана в момент часу k [10]. Точніше, проблема може бути сформульована як проблема оптимізації:

$$\max_{\mu_k} E[\|Q_k - G_k\|^2 | Q_{k-1}, \xi_k] \quad (4)$$

де $\mu_k \triangleq [\mu_{1,k}^T, \dots, \mu_{N,k}^T]^T$. Враховуючи, що W_k включає в себе глобальну топологічну інформацію, яку часто важко отримати для кожного окремого агента в розподіленій системі, і $\|(W_k \triangleq I)V_k\| \leq \|V_k\|$, замінюємо рівняння 4 наступною субоптимальною оптимізацією:

$$\max_{\mu_k} E[\|V_k\|^2] = \sum_{g \in O} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_{i,k}} E[v_{j,g,k}^2] 1_{\{g \in \mathbb{C}_{j,k}\}} \quad (5)$$

Зверніть увагу, що рівняння 5 не є апроксимацією рівняння 4, а новою функцією вартості, яку ми маємо намір оптимізувати, і яка є верхньою межею рівняння 5. Такий спосіб визначення функції витрат є дуже поширеним в статистиці та теорії оцінки, таких як нижня границя Крамера-Рао, яку часто вибирають як функцію вартості, якщо істинна дисперсія помилки оцінювання змінюється.[11]

Слідуючи рівнянню 5, потрібно намагатися максимізувати $E[v_{j,g,k}^2]$ і колективну зону відчуття всіх агентів:

$$E[v_{j,g,k}^2] = \begin{cases} \left\| p_{j,k} \ln \frac{q_{j,k}}{p_{j,k}} + (1 - q_{j,k}) \ln \frac{1 - q_{j,k}}{1 - p_{j,k}} \right\|^2, & \theta_{g,k} = 1 \\ \left\| q_{j,k} \ln \frac{q_{j,k}}{p_{j,k}} + (1 - p_{j,k}) \ln \frac{1 - q_{j,k}}{1 - p_{j,k}} \right\|^2, & \theta_{g,k} \neq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$E[v_{j,g,k}^2]$ монотонно зростає по відношенню до $p_{j,k}$

і монотонно зменшується по відношенню до $q_{j,k}$, при чому неважливо $\theta_{g,k} = 1$ або ні. Таким чином, рівняння 5 далі замінюється наступною проблемою оптимізації:

$$\max_{\mu_k} H(\mu_k) = \sum_{i=1}^N \int_{M_{i,k}} \phi_k(r) (p_{i,k} - q_{i,k}) 1_{\{r \in \mathbb{C}_{i,k}\}} dr \quad (7)$$

де ϕ_k - задана невід'ємна вагова функція $r \in O$ за час k .

$\{M_{1,k}, \dots, M_{N,k}\}$ це розбиття O за час k за умови

$\mu_{i,k} \in M_{i,k}$. Впровадження розбиття полягає в тому, щоб уникнути зіткнення між БПЛА та полегшити взаємодію з переповненими регіонами зондування між сусідніми агентами. Оскільки $p_{i,k} \geq q_{i,k}$, $H(\mu_k)$ завжди невід'ємне

і $H(\mu_k) = 0$, якщо $h_{i,k} \geq \bar{h}$. Позначимо через $\partial(\bullet)$ границю відповідної області і $n_{\partial(\bullet)}(r)$ спрямований назовні нормальний вектор $\partial(\bullet)$ в точці r , ми можемо обчислити градієнт $H(\mu_k)$. [12]

СИМУЛЯЦІЯ МОДЕЛІ

Під час симуляції було задіяно кілька безпілотників для пошуку чотирьох наземних цілей. Вся область спостереження є квадратною областю, в межах якої лежить два перехрестя, позначені $O_R \subset O$. За умови, що чотири цілі залишаються або переміщуються лише по дорогах, і інші цілі не з'являються поза дорогами в регіоні спостереження. За час k , кожна ціль $z(z=1,2,3,4)$ випадковим чином переміщується до однієї з клітин у наборі $\{g \in O_R : \|g - Tar_{z,k-1}\| \leq V_{Tar}\}$ де $Tar_{z,k-1}$ це клітинка, в якій вона знаходиться за час $k-1$, і V_{Tar} - це найбільша швидкість руху цілі. Отже,

$$P(\theta_{g,k} = 1 | \theta_{r,k} - 1 = 1) = \frac{1}{\sum (g - R)}, \{g \in D_r, r \in O\},$$

де $D_r = \{g \in O_r : \|g - r\| \leq V_{Tar}\}$. [13] Спочатку було встановлено $Q_{i,g,0} = 0$ для всіх i та g в межах доріг ($p_{i,g,k} = 0.5, g \in O_r$), і $Q_{i,g,0}$ для фіксованого великого значення g поза дорогами ($p_{i,g,k} \approx 0, g \notin O_R$). Припускається, що функція ймовірності виявлення та

функція ймовірності помилкового сигналу описується рівняннями

$$f_1(h_{i,k}) = K_1 e^{-K_2(h_{i,k}-h)^2}, \quad i$$

$f_2(h_{i,k}) = K_3 e^{K_4(h_{i,k}-h)^2}$, відповідно де K_1, K_2, K_3, K_4 є позитивними параметрами, що задовольняють умовам:

$$p_{i,k} = \begin{cases} 0.5, h_{i,k} \geq h \\ f_1(h_{i,k}), h < h_{i,k} < \bar{h} \\ 0, 0 < h_{i,k} \leq h \end{cases} \quad q_{i,k} = \begin{cases} 0.5, h_{i,k} \geq h \\ f_2(h_{i,k}), h < h_{i,k} < \bar{h} \\ 0, 0 < h_{i,k} \leq h \end{cases} \quad (8)$$

Запропонований метод цільового пошуку був протестований у двох сценаріях. У сценарії 1 всі цілі з'являються в $k = 0$ і зберігають нерухомість протягом всього процесу пошуку, тобто $V_{Tar} = 0 \frac{m}{s}$. В сценарії 2,

встановлюється $V_{Tar} = 1 \frac{m}{s}$ для перевірки впливу цільової

рухливості на збіжність ймовірнісних карт. Чотири цілі також з'являються при $k = 0$, але не зникають під час пошуку. У цих двох сценаріях ми перевіряємо ефективність запропонованого методу цільового пошуку, розгортаючи різну кількість безпілотників та використовуючи різні фактори, що розкладають інформацію. Початкові позиції безпілотних літальних апаратів випадковим чином вибираються в межах регіону $[0,5]^3 m^3$. Розподіл $\{M_{1,k}, \dots, M_{N,k}\}$ породжується розподілом Вороного.[14] Діапазон зв'язку встановлений як $R_c = 20m$, а протокол управління зв'язком застосовується для обслуговування підключення. Розмір комірки фіксується як $1 \times 1 m^2$. Інші ключові параметри відповідно встановлюються як

$$K_u = 0.3, K_\phi = 2, q = 0.1, p = 0.99, \hat{q} = 0.01, \bar{h} = 10m,$$

$$h = 5m, \alpha = 0, u_{\max} = 2 \frac{m}{s}, T = 1s.$$

Оскільки збіжність індивідуальної ймовірності карти p і агента означає, що вага $\phi_{i,k}(g)$ прямує до 0 для кожної клітини, визначаємо наступну середню вагу для оцінки ефективності конвергенції всієї мережі:

$$\phi_k = \frac{1}{NM_R} \sum_{i=1}^N \sum_{g \in O_R} \phi_{i,k}(g) \quad (9)$$

де M_R позначає загальну кількість клітин у межах доріг. Легко виявити, що початкове значення ϕ_k є

$$\phi_0 = \frac{1}{NM_R} \sum_{i=1}^N \sum_{g \in O_R} e^{-K_\phi \|Q_{i,g,0}\|} = 1. [15] \quad \text{У моделюванні}$$

було порівняно результати ϕ_k з різними системними параметрами. Результати були усереднені з декількох моделей.

В 1-му експерименті цілі, які потрібно було знайти, були статичні, тобто відбувався процес конвергенції карт індивідуальних ймовірностей сценарію із стаціонарними цілями, де ймовірності збігаються до 1 для клітин, у межах яких справді існують цілі, і 0 для клітин, в яких немає цілі. Крім того, ϕ_k нарешті сходиться до 0, і чим більше агентів розгортається, тим швидше він збігається, як показано на рисунку 3.

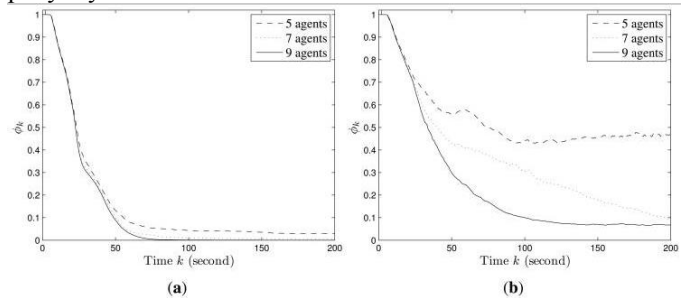


Рис.3. Результати першого експерименту.

В другому експерименті відбувався процес конвергенції індивідуальної карти ймовірності в сценарії з мобільними цілями, де вірогідність для клітин навколо цілей може не сходити до 0, як у першому експерименті, через випадкову мобільність цілей. Проте, все-таки можливо зробити висновок, що на дорогах є чотири цілі, і вони мають грубу оцінку своїх позицій на основі конвертів кінцевих карт ймовірностей безпілотних літальних апаратів. У цьому випадку ϕ_k не збігається з 0, як показано на рисунку 4.[16] Однак менший ϕ_k може бути отриманий з більшою кількістю агентів, розгорнутих після того, як площа колективного зондування стає більшою. У порівнянні з результатами першого експерименту кількість впроваджених агентів більшою мірою впливає на ефективність конвергенції карт ймовірностей в сценарії з випадковою мобільністю. Отже, алгоритм є більш надійним, з більшою кількістю розгорнутих БПЛА.

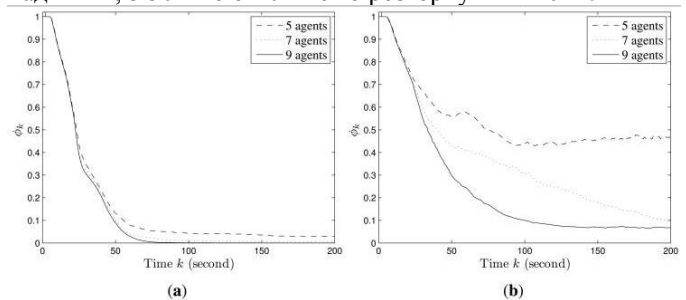


Рис.4. Результати другого експерименту.

Крім того, було також перевірено вплив фактору зниження інформації на результати конвергенції. Відповідно до результатів моделювання (як показано на рисунку 5), більший фактор розпаду призведе до збільшення середньої невизначеності щодо цільового існування у всьому регіоні, оскільки накопичена інформація для кожної клітини скорочується швидше. Справді, конструктивна мета розпад-фактора полягає в тому, щоб дозволити агентам переглядати кожну клітинку на певній частоті для оновлення останньої інформації про існування цілі в клітині. Тому компроміс полягає в тому,

що більший фактор, що знижується, призводить до більшої невизначеності, але змушує агентів приділяти більше уваги клітинам з меншою кількістю спостережень. Проте, немає кількісного способу вибору фактору, що розкладається, і користувачі можуть знайти правильний за допомогою методу моделювання.

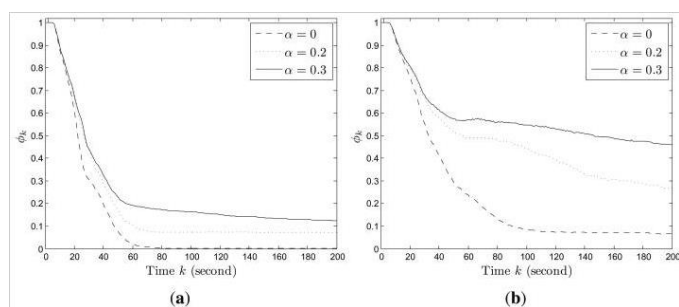


Рис.5. Результати впливу фактору зниження інформації на результати конвергенції.

Висновки

Отримані результати ілюструють те, що мультиагентний підхід варто використовувати у разі виконання БПЛА в складі групи окремих задач і забезпечення обміну між ними даними, що не мають критичної терміновості. Проблема уникнення несподіваних зіткнень між БПЛА лежить на датчиках і знанні маршрутів руху інших БПЛА.

Ройовий підхід слід використовувати, коли для виконання окремої задачі або групи схожих задач використовується велика кількість порівняно недорогих БПЛА, які функціонують як розподілений у просторі об'єкт, частини якого постійно обмінюються між собою інформацією про свій стан.

Більш детально було досліджено тривимірне бачення кооперативного пошуку як підметода в мультиагентному підході та злиття інформації в цільовому пошуку групою безпілотних літальних апаратів з обмеженими можливостями зондування та зв'язку. Побудовано вірогідність евристичного виявлення та вірогідність помилкових сигналів, що пов'язані з цільовою дискримінацією камери і зміною залежно від висоти. Сформульовано цільову пошукову проблему як проблему оптимізації покриття. Запропоновано модель модифікації узагальненої моделі вірогідності шляхом розгляду розпаду інформації та передачі через зміни навколишнього середовища, такі як цільовий рух. Результати моделювання показали, що запропоновані алгоритми дозволяють зробити карти індивідуальних імовірностей всіх агентів – справжнє середовище, коли цілі стаціонарні. Також було проілюстровано вплив цільової мобільності та кількості розгорнутих БПЛА на збіжність карт імовірностей. Після цієї роботи існує ще великий потенціал для подальшого розвитку та узагальнення запропонованого методу. Наприклад, розширення можливостей виявлення за допомогою гетерогенних датчиків, оскільки більша кількість типів інформації можуть бути об'єднані, щоб покращити ефективність виявлення об'єктів, що розшуковуються. Потрібно в подальшому також проводити

дослідження методів пошуку, які враховують реалістичні умови оточуючого середовища та системні умови, які можуть впливати на результати пошуку, такі як інтенсивність світла, блок на лінії зору, камера з регульованим фокусом, асинхронне спілкування тощо.

ЛІТЕРАТУРА

- Трубіников Г. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях / Г. В. Трубіников. – 2008. – С. 1.
- Baxter J. W. Fly-by-Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi-Agent System / J. W. Baxter, G. S. Horn, D. P. Leivers. // QinetiQ Ltd Malvern Technology Centre St Andrews Road. – 2007.
- Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. О. Скобелев. – Самара, 2003. – 418 с. – (Автометрия). – (6).
- Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К. С.Амелин, Е. И. Антал, В. И. Васильев, Н. О. Граничина. // СПГУ. – 2009. – С. 160–161.
- Попов В. А. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом / В. А. Попов, Д. В. Федутин. // ФГУП "ГосНИИАС".
- Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / Д. Я. Иванов. // Известия ЮФУ. – С. 222–225.
- Yang Y. Multi-UAV cooperative search using an opportunistic learning method. / Yang Y, Polycarpou M, Minai A., 2007. – 716 с. – (Control).
- An Aerial-Ground Robotic System for Navigation and Obstacle Mapping in Large Outdoor Areas. Sensors. / Garzón M., Valente J, Zapata D, Barrientos A. // PMC. – 2013. – №13. – С. 1247–1267.
- Multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Cooperative Fault Detection Employing Differential Global Positioning (DGPS), Inertial and Vision Sensors. / Heredia G., Caballero F, Maza I та ін.], 2009. – 7566 с. – (PMC). – (9).
- Yang Y. Decentralized cooperative search by networked UAVs in an uncertain environment. / Yang Y., Minai A, Polycarpou M. – Boston, MA, USA, 2004. – 5558 с. – (Proceedings of the American Control Conference).
- Arai T. Editorial: Advances in multi-robot systems / Arai T, Pagello E, Parker L.E. – Autom, 2002. – 655 с. – (IEEE Trans). – (18).
- Schwager M. Decentralized Adaptive Coverage Control for Networked Robots / Schwager M, Rus D., Slotine J., 2009. – 357 с. – (Robot. Res). – (28).
- Horn R. Matrix Analysis / Horn R, Johnson C.. // Cambridge University Press. – 1990. – С. 68–74.
- Hu J. Distributed cooperative control for deployment and task allocation of unmanned aerial vehicle networks. / Hu J, Xu Z., 2013. – 1574 с. – (IET Control Theory Appl). – (7).
- Bertuccelli L. Robust UAV search for environments with imprecise probability maps. / Bertuccelli L, How J.. –

- Seville, Spain, 2005. – 5680 c. – (Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control).
22. Xiao L. A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. / Xiao L, Boyd S, Lall S. – Los Angeles, CA, USA., 2005. – 63 c. – (Proceedings of the 4th International Symposium Information Processing in Sensor Networks

